

Sami Sohlberg

Hybridisovellukset laivajärjestelmissä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

29.4.2013

Tekijä Otsikko	Sami Sohlberg Hybridisovellukset laivajärjestelmissä
Sivumäärä Aika	43 sivua 29.4.2013
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Design Manager Tapani Skarp Laboratorioinsinööri Tomi Hämäläinen
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia eri hybridisovelluksia laivajärjestelmiin. Työ tehtiin Arctech Helsinki Shipyard Oy:n toimeksiannosta. Eri säädökset ja direktiivit pakottavat laivanrakentajat tarjoamaan vähäpäästöisempiä ratkaisuja, joita on pystytty toteuttamaan hybridisovelluksilla. Hybridisovellukset kiinnostavat varustamoita niillä saavutettavien säästöjen takia. Lisäksi luonnonsuojelu on noussut merkittävään asemaan ilmaston lämpenemisestä johtuen.</p> <p>Työn alkuosassa käsitellään laivan eri järjestelmiä sekä vaihtoehtoisia energialähteitä. Työn keskiosassa käydään läpi hybridijärjestelmien soveltamista laivan eri järjestelmissä. Lopussa kerrotaan tämänhetkisistä hybridisovelluksista laivoissa.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin kirjallisuustutkimuksena. Työssä keskityttiin hybridisovelluksiin, jotka sopisivat noin 100 metrin pituisiin offshore-aluksiin. Jäänmurtotilanteissa oli tarkoitus pysyä nykyisessä energiantuottomuodossa, koska tällöin tehontarve on suuri. Työn tarkoituksena ei ollut luoda uusia ratkaisuja, vaan kartoittaa hybridisovelluksien tämänhetkinen tilanne.</p>	
Avainsanat	Hybridisovellus, laivajärjestelmä, offshore, energialähde, akku, polttokenno, aurinkopaneeli, tuulivoima

Author Title	Sami Sohlberg Hybrid applications for marine systems
Number of Pages Date	43 pages 29 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Tapani Skarp, Design Manager Tomi Hämäläinen, Laboratory Engineer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to study and analyze hybrid solutions for marine systems. This thesis was assigned by Arctech Helsinki Shipyard Ltd.</p> <p>To start with, new regulations and directives encourage the shipbuilders to develop and provide cleaner solutions using hybrid applications. Hybrid applications interest shipping companies due to savings achieved by them. In addition, the nature conservation has become a significant concern due to the global warming. The aim of this thesis was also to gather more information about alternative sources of energy.</p> <p>The beginning of this Bachelor's thesis examines marine systems and especially the alternative sources of energy that could be used for marine systems. Secondly, different hybrid applications in use of marine systems are described. Finally, this thesis studies ships and vessels and their use of hybrid applications.</p> <p>The material of this thesis was collected from literature. The project focuses on investigating the hybrid systems that could be used for 100 meter long offshore vessels.</p>	
Keywords	Hybrid application, marine system, offshore, source of energy, battery, fuel cell, solar panel, wind energy

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Työn tausta	1
3	Propulsiojärjestelmä	4
4	Akku	9
4.1	Akun toimintaperiaate	9
4.2	Lyijyakku	10
4.3	Litium-ioniakku	11
4.4	Nikkeli-kadmiumakku	12
4.5	Natrium-rikkiakku	13
4.6	Virtausakku	14
5	Energialähteet	15
5.1	Polttokenno	15
5.1.1	Protoninvaihtopolttokenno	19
5.1.2	Kiinteäoksidipolttokenno	20
5.1.3	Sulakarbonaattipolttokenno	21
5.2	Aurinkopaneeli	23
5.3	Tuulivoima	23
6	Hybridijärjestelmät	23
7	Hybridipropulsiojärjestelmä	25
8	Hybridisovellukset nykylaivoissa	30
8.1	Viking Lady	30
8.2	Undine	32
8.3	MV Hallaig	32
8.4	Japanilaiset autonkuljetusalukset	33
9	Yhteenveto	35
	Lähteet	39

Lyhenteet

A	Ampeeri
AC	Vaihtovirta
Ah	Ampeeritunti
Al ₂ O ₃	Alumiinioksidi
Anodi	Negatiivinen napa
CO _x	Hiilen oksidit (hiilimonoksidi CO sekä hiilidioksidi CO ₂)
DC	Tasavirta
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
Katodi	Positiivinen napa
KOH	Kaliumhydroksidi
kW	Kilowatti
kWh	Kilowattitunti
LNG	Nestemäinen maakaasu
NaBr	Natriumbromidi
NiOOH	Nikkelioksihydroksidi
NO _x	Typen oksidit (typpimonoksidi NO sekä typpidioksidi NO ₂)
PM	Pienhiukkaspäästöt
rpm	Kierrosta minuutissa
V	Voltti
VBr	Vanadiumbromidi
ZnBr	Sinkkibromidi

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan eri hybridisovellusvaihtoehtoja, jotka soveltuvat noin 100 metrin pituisiin offshore-aluksiin. Tutkimuksen ulkopuolelle on jätetty jäätä murtavien alusten jäänmurtotilanteet, koska tehontarve on tällöin suuri. Satamassa sekä pienillä nopeuksilla ajettaessa hybridisovellukset ovat kiinnostava vaihtoehto keskinopeille dieselmoottoreille, koska tällöin moottori joutuu toimimaan optimaalisen kierrosalueen ulkopuolella.

Työ aloitettiin laivan eri järjestelmien kartoittamisella, jonka jälkeen tutkittiin, voitaisiinko eri laivajärjestelmien tarvitsema energia tuottaa vaihtoehtoisella tavalla. Työtä varten tarkasteltiin tämänhetkistä kehitysastetta polttokenno-, akku-, aurinkopaneeli- ja tuuli-voimatekniikassa sekä sitä, miten näitä voisi soveltaa propulsio- ja muissa laivajärjestelmissä. Lisäksi selvitettiin, mitä hybridisovelluksia on toteutettu nykyisiin laivoihin. Lopuksi pohdittiin eri vaihtoehtojen hyviä sekä huonoja puolia.

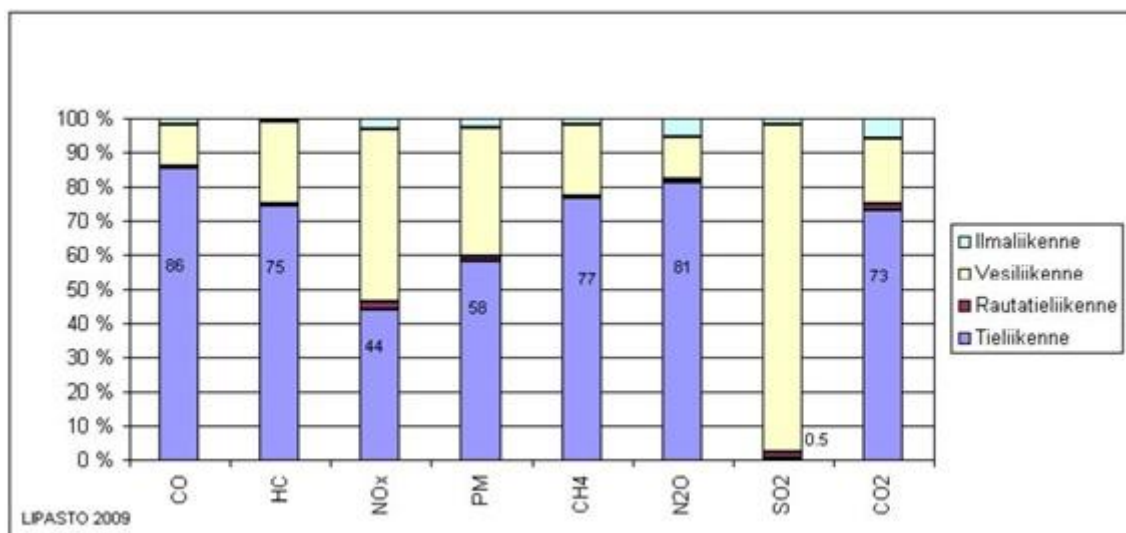
Opinnäytetyö tehtiin Arctech Helsinki Shipyard Oy:n toimeksiannosta. Työn tarkoituksena oli saada tietoa tämänhetkisistä hybridiratkaisuista, jotta näitä voitaisiin soveltaa tulevilla myyntiprojekteissa. Arctech on STX Finlandin ja United Shipbuilding Corporationin tasaosuuksin omistama yritys, joka on erikoistunut arktisten offshore-alusten sekä jäänmurtajien rakentamiseen. Arctech sijaitsee Helsingin Hietalahdella ja työllistää noin 400 omaa työntekijää sekä suuren määrän eri alojen alihankkijoita. Arctech on aloittanut toimintansa vuonna 2011, mutta telakan historia ulottuu aina vuoteen 1865. Lähes 150-vuotisen historian aikana Helsingin telakalla on rakennettu 60 % maailmalla tällä hetkellä toimivista jäänmurtajista. [16.]

2 Työn tausta

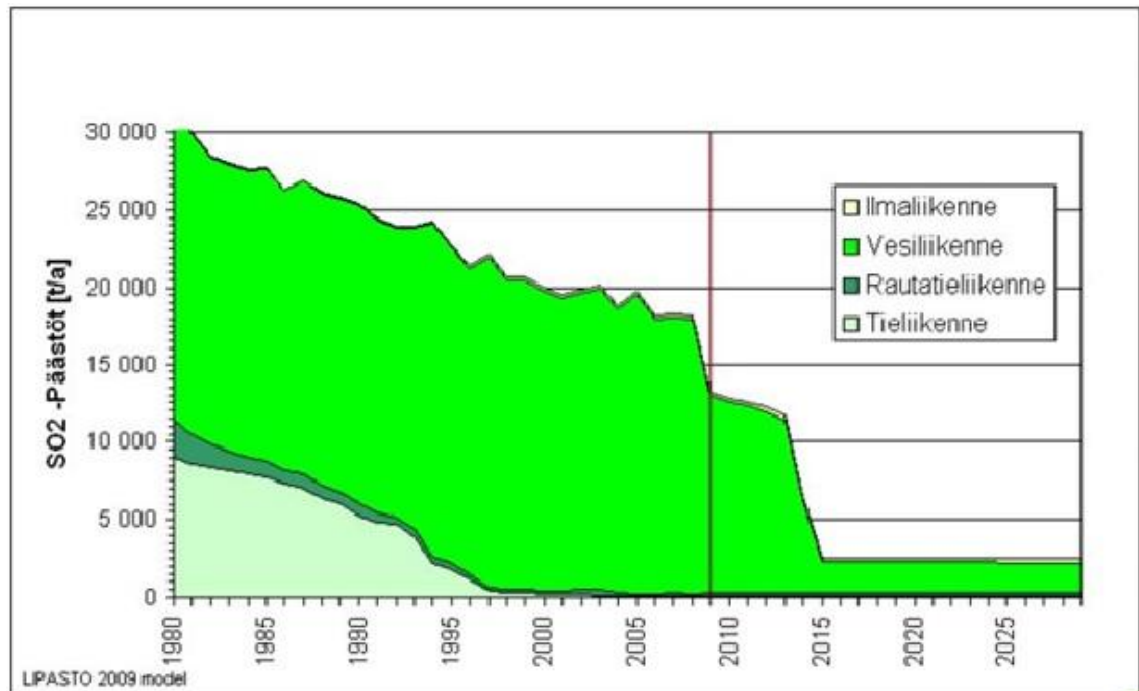
Tänä päivänä valtioiden direktiivit ja säädökset pakottavat kone- ja laivanrakentajat tarjoamaan vähäpäästöisempiä ratkaisuja. Fossiiliset polttoaineet halutaan korvata uusiutuvilla energialähteillä. Ratkaisuna on kehitetty eri hybridisovelluksia, joissa polttoaineenkulutusta ja tätä kautta päästöjä on pyritty vähentämään. Hybridisovelluksella tarkoitetaan kahden tai useamman eri energialähteen käyttämistä. Hybridisovelluksilla pyritään optimoimaan polttoaineenkulutus suorituskyvyn muuttumatta. Hybridisovelluk-

set kiinnostavat varustamoita niillä saavutettavien säästöjen takia. Myös luonnonsuojelu on noussut merkittävään asemaan ilmaston lämpenemisen myötä.

Yksi päästöihin ja hybridisovelluksien käyttöönottoon vaikuttavista direktiiveistä on EU:n rikkidirektiivi 2012/33/EY. Tällä direktiivillä vuodesta 2015 lähtien pudotetaan laivojen polttoaineen rikkipitoisuus nykyisestä 1 %:sta 0,1 %:iin, kun laiva viettää yli kaksi tuntia satamassa tai purjehtii rikinoksidipäästöjen valvonta-alueilla. Lisäksi rikkidirektiivi rajoittaa vuodesta 2020 lähtien EU:n aluevesillä liikkuvien alusten polttoaineen rikkipitoisuuden enintään 0,5 %:seksi. Direktiivi sallii raskaan polttoöljyn käytön aluksissa, joissa on erillinen suljettu järjestelmä päästöjen vähentämiseksi. Vaihtoehtoiset energialähteet sekä hybridiratkaisut ovat sallittuja, kunhan päästöt eivät ole suuremmat, kuin direktiivin mukaista polttoainetta käyttävän aluksen päästöt. Polttoainetta ei tarvitse vaihtaa vähemmän rikkiä sisältävään polttoaineeseen satamassa olon ajaksi, jos laivan tarvitsema sähkö voidaan ottaa maista satamassa olon aikana. Tällöin kaikkien moottoreiden on oltava sammutettuina. Kuvasta 1 nähdään, että rikkidioksidipäästöt olivat vuonna 2009 laivoissa huomattavan korkeat muihin liikennemuotoihin nähden, mikä on omalta osaltaan edesauttanut uuden rikkidirektiivin valmistumista. Lisäksi typpi- ja pienhiukkaspäästöt olivat korkealla tasolla, vaikka tieliikenne tuottikin vastaavia päästöjä lähes yhtä paljon. Kuvassa 2 nähdään vuotuiset rikkipäästöt sekä uuden direktiivin odotettu vaikutus rikkipäästöihin Suomen liikenteessä. Kuvan 2 jyrkkä lasku vuosille 2014–2015 selittyy rikkidirektiivillä. Polttoaineen rikkipitoisuutta tullaan laskemaan joko siirtymällä vähärikkiseen polttoaineeseen tai rikkipesureiden avulla. [1; 3; 4; 5.]

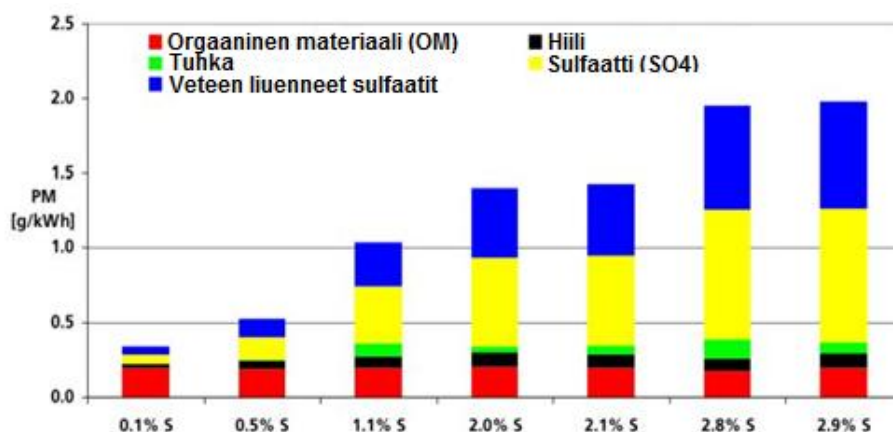


Kuva 1. Liikenteen päästöosuudet liikennemuodoittain vuonna 2009 [1].



Kuva 2. Suomen liikenteen rikkidioksidipäästöt [1].

Kuvasta 3 nähdään, että mitä matalampirikkistä polttoainetta käytetään, sitä vähemmän syntyy muita päästöjä. Kuvan 3 mukaan esimerkiksi 1,1 % rikkiä sisältävä polttoaine tuottaa suurempien rikkipäästöjen lisäksi myös muita päästöjä kuten nokea verrattuna 0,5 % rikkiä sisältävään polttoaineeseen. Vähärikkisen polttoaineen haittana on, että se maksaa noin 200 € enemmän tonnilta, kuin raskas polttoöljy. Rikkipesurit tulevat maksamaan 1–5 miljoonaa € pesuria kohden. Lyhyellä tähtäimellä EU:n aluevesillä tullaan siis käyttämään kalliimpaa polttoainetta ja pidemmällä tähtäimellä rikkipesureita. Kolmantena vaihtoehtona ovat LNG-moottorit, eli nestemäistä maakaasua polttoaineenaan käyttävät moottorit. LNG-moottoreiden rikkipäästöt ovat lähellä nollaa sekä CO₂-päästöt ovat 25 % pienemmät kuin 1 % rikkiä sisältävää polttoainetta käyttävällä dieselmoottorilla. Neljäntenä vaihtoehtona tulevat olemaan vaihtoehtoiset energialähteet sekä hybridiratkaisut, joilla rikkipäästöt saadaan nollaan tai lähelle sitä. [1; 2; 3; 4; 6.]



Kuva 3. Polttoaineen rikkipitoisuuden vaikutus muihin hiukkaspäästöihin [1].

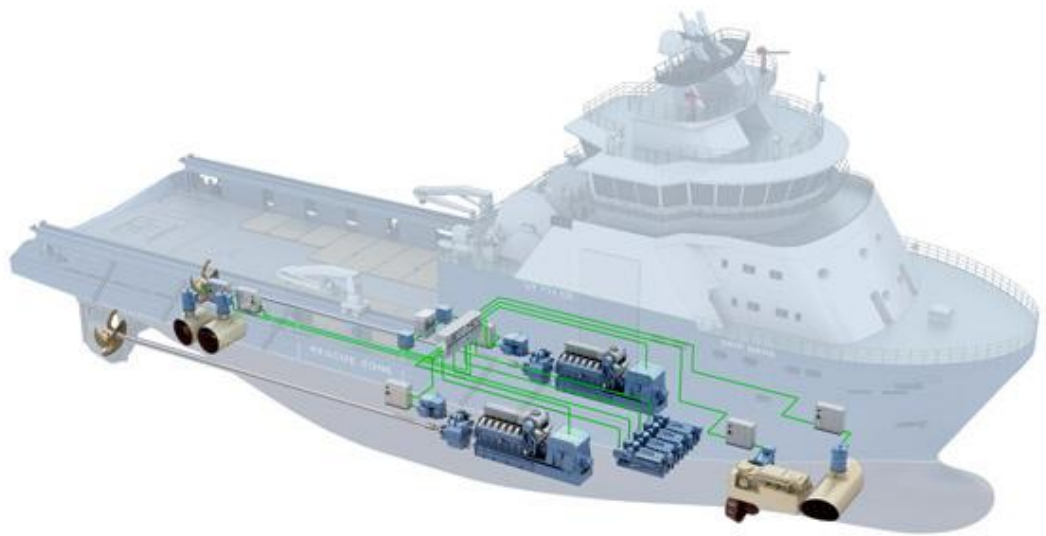
Laivan moottorin käyntialuetta voi verrata autojen moottoreihin. Hybridiauto voi käydä taajamassa täysin päästöttömästi akkuja käyttävien sähkömoottoreiden avulla. Akut voidaan ladata yön aikana, latauspaikkoja löytyy riittävästi ja moottorin turhalta tyhjäkäynniltä säästytään. Suurilla nopeuksilla ja pidemmällä matkoilla polttomoottori on energiatehokkaampi vaihtoehto, koska tehontarve kasvaa nopeuden kasvaessa. Laivasovelluksissa satama-alueella purjehdittaessa nopeudet ovat pieniä, jolloin dieselmoottori ei käy optimaalisella kierrosalueella ja tämän takia polttoaineenkulutus kasvaa. [7.]

Keskimääräisen offshore-aluksen polttoaineen vuotuinen kulutus vastaa noin 6 000 henkilöauton vastaavaa lukemaa. Samoin vuotuiset CO_x-päästöt vastaavat noin 6 000 henkilöautoa, NO_x-päästöt vastaavat noin 90 000 henkilöautoa sekä vuotuiset PM-päästöt vastaavat noin 100 000 henkilöautoa. Hybridijärjestelmän toteuttaminen laivaan tuo lisäkustannuksia 4–5 %, kun vastaava luku henkilöautossa on 20–30 %. Hybridisovelluksella saadaan pelkissä polttoainekuluissa säästettyä liki 11 %. [2.]

3 Propulsiojärjestelmä

Laiva koostuu yli 100 järjestelmästä, jotka kuluttavat sähköä. Nykyisin laivoissa otetaan kaikkien sähköä käyttävien laitteiden virta yhdestä voimalaitoksesta. Sähköä tuotetaan keskinopeakäyntisellä dieselmoottorilla, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Eniten sähköä kuluttaa laivan propulsiojärjestelmä. Propulsiojärjestelmä vastaa laivan liikuttamisesta. Muita laivajärjestelmiä ovat valaistus, navigointijärjestelmät, ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmät sekä eri laitteiden käyttöjärjestelmät.

Propulsio- eli potkurijärjestelmä suunnitellaan laivakohtaisten suorituskykyvaatimusten perusteella. Propulsiojärjestelmät voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, jotka ovat dieselmekaaninen propulsio sekä dieselsähköinen propulsio. Dieselmekaanisessa propulsiossa otetaan propulsiojärjestelmän tarvitsema teho akselilinjan välityksellä suoraan dieselmoottorilta (kuva 4). Dieselsähköisessä propulsiossa dieselmoottori pyörittää generaattoria, jolta potkuria pyörittävä sähkömoottori saa tarvitsemansa virran (kuva 5). Dieselmekaaninen propulsio on sidottu moottorin pyörimisnopeuteen, minkä takia dieselmoottori ei käy optimaalisella kierrosalueella pienillä nopeuksilla. Dieselsähköisessä propulsiossa potkurin pyörimisnopeutta säädetään sähkömoottorin avulla, mikä mahdollistaa dieselmoottorin käymisen optimaalisella kierrosalueella. Energiahäviöitä syntyy dieselsähköisessä järjestelmässä enemmän, kuin dieselmekaanisessa järjestelmässä. Aluksi dieselmoottorin mekaaninen energia muutetaan generaattorilla sähköiseksi, minkä jälkeen sähköinen energia muutetaan takaisin mekaaniseksi energiaksi. [8.]

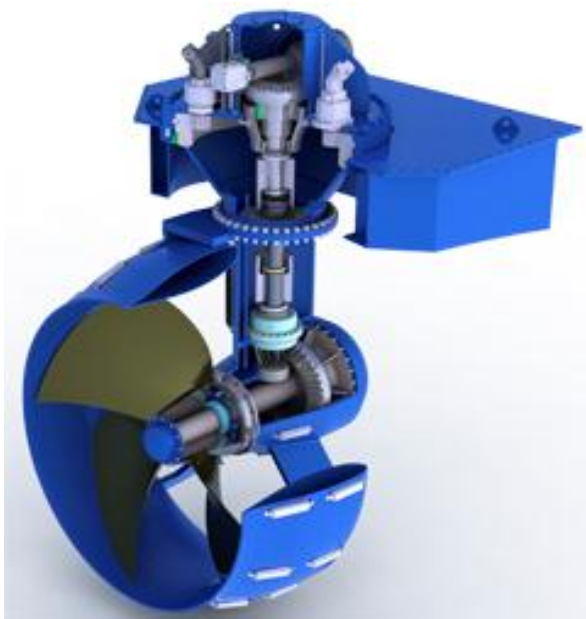


Kuva 4. Dieselmekaaninen propulsiojärjestelmä [12].



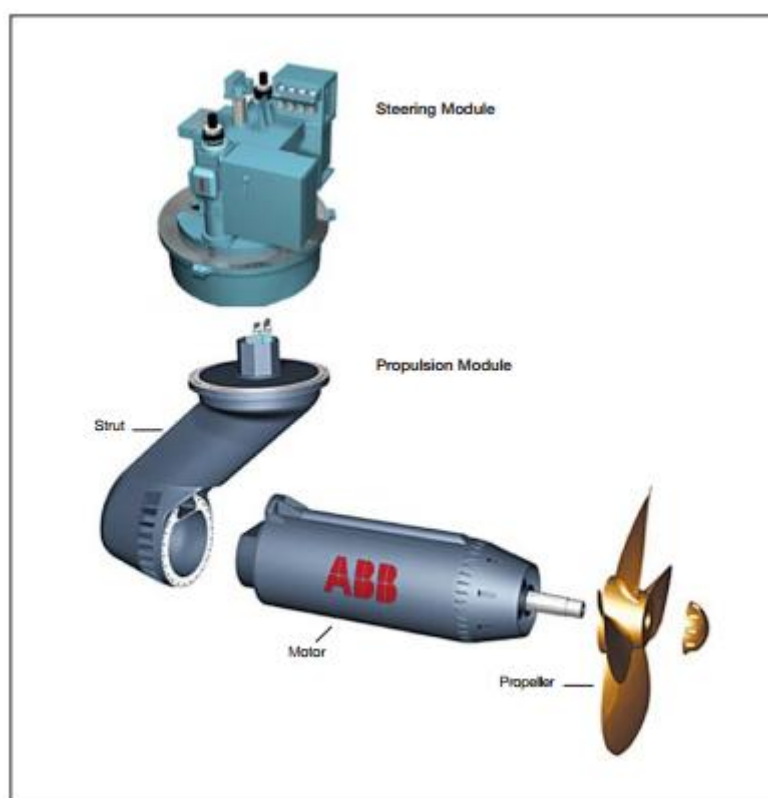
Kuva 5. Dieselsähköinen propulsiojärjestelmä [14].

Potkurijärjestelmiä on akselilinjaisia (kuva 4) sekä ruoripotkurijärjestelmiä (kuva 5). Ruoripotkurijärjestelmiä on akselilinjoihin perustuvia sekä sähköisiä yksiköitä. Ruoripotkuriyksiköitä löytyy sekä työntävinä, että vetävinä. Akselilinjaisessa ruoripotkuriyksikössä potkurin akselit on sijoitettu L:n tai Z:n muotoisesti propulsioyksikön koosta sekä moottorin paikasta riippuen (kuva 6). Sähköisessä ruoripotkuriyksikössä potkuria pyörittävä sähkömoottori sijaitsee propulsioyksikön sisällä (kuva 8). Perinteisessä akselilinjassa tarvitaan erillistä peräsintä laivan ohjaamiseen. Ruoripotkuriyksikössä potkuri pääsee kääntymään akselinsa ympäri 360 astetta, minkä takia erillistä peräsintä ei tarvita. Perinteinen akselilinja vie laivassa paljon tilaa. Lisäksi akselilla on suuret lujuusvaatimukset sekä tiukat toleranssit asennuksen suhteen. [8; 10; 11.]



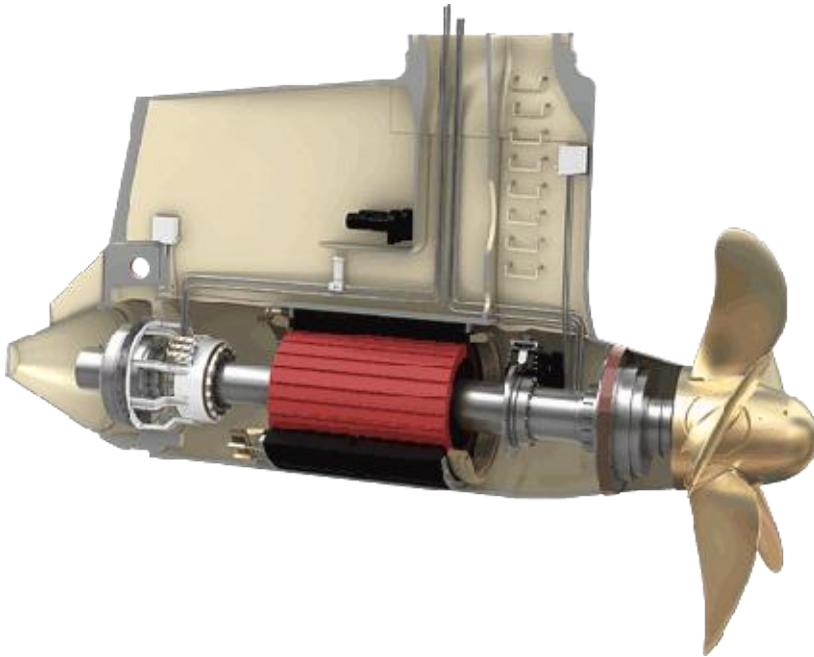
Kuva 6. Akselilinjainen ruoripotkuriyksikkö [13].

Ruoripotkureita valmistavat muun muassa ABB (Azipod), Rolls-Royce sekä Steerprop. Azipod (kuva 7) on sähköinen ruoripotkuriyksikkö, jota ohjataan propulsiokäyttöillä. Käyttöohjauksen ansiosta Azipodin pyörimisnopeus toimii täysin portaattomasti, mikä mahdollistaa dieselmoottorin toimimisen optimaalisella kierrosalueella tai lähellä sitä. Azipod-järjestelmässä on sisäänrakennettuna propulsiomoottori, pääpotkurimoottori, peräsin ja perän ohjauspotkuri sekä näiden hallintaan liittyvät toiminnot, mikä vapauttaa tilaa laivan muille laitteille. Risteilyaluksissa on osoitettu Azipodien vähentävän 10 % polttoaineenkulutusta verrattuna sähkömoottorilta lähtevää akselilinjaa käyttäviin dieselsähköisiin propulsiojärjestelmiin. [8; 10; 11.]



Kuva 7. Azipod ruoripotkuriyksikön rakenne [9].

Rolls-Roycen Mermaid-tyypin (kuva 8) propulsio on lähinnä ABB:n Azipodia. Rolls-Roycella on myös mekaanisia ruoripotkuriyksiköitä, joiden toiminta perustuu 2–3 akseliin. Mekaanisia ruoripotkuriyksiköitä on myös Steerpropin propulsioyksiköissä. Rolls-Roycen sekä Steerpropin mekaanisten azimuth-yksiköiden akselit on sijoitettu L:n tai Z:n muotoisesti riippuen propulsioyksikön muodosta ja koosta. Huonona puolena mekaanisessa ruoripotkurissa on erillisen sähkömoottorin vievä tila. Lisäksi mekaanisessa ruoripotkuriyksikössä syntyy kitkahäviöitä, mikä huonontaa sen hyötysuhdetta. [10; 11.]



Kuva 8. Rolls-Roycen Mermaid propulsioyksikön rakenne [10].

Dieselsähköisen propulsiojärjestelmän sovelluksia löytyy jäänmurtajista sekä jäätä murtavista offshore-aluksista. Esimerkkisovellus dieselsähköiselle ruoripotkurisovellukselle on vinomurtaja. Vinomurtajan (kuva 9) tarkoitus on murtaa jäätä kylki edellä, jolloin saadaan murrettua leveämpää laivakaistaa. Tässä sovelluksessa on 3 dieselsähköistä ruoripotkuriyksikköä, mikä mahdollistaa laivan liikkumisen halutulla tavalla.



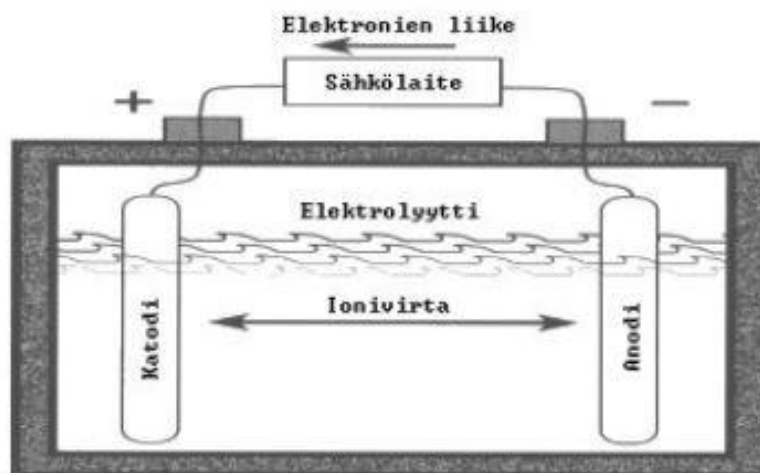
Kuva 9. Vinomurtaja [16].

4 Akku

Hybridisovelluksissa tarvitaan energiavarastoja energian varastoinniseksi sekä sähköverkon tasaamiseksi. Energiavarastojen pääsääntöinen tarkoitus on varastoida energiaa, jotta laite voi ottaa siltä tarvitsemansa energian tarpeen vaatiessa. Kun käytössä on aurinkopaneelit tai tuulivoima, aiheutuu sähköverkkoon piikkejä, jolloin energiavarastojen avulla saadaan tasattua sähköverkkoa. Energiavarastoja ovat akut, kondensaattorit sekä vauhtipyörät. Akut toimivat sähkökemiallisesti, kondensaattorit sähköisesti ja vauhtipyörät mekaanisesti. Akut ovat eniten käytetty energiavarasto, koska ne ovat purkausvaiheessa parhaiten säädettävissä. [17; 18.]

4.1 Akun toimintaperiaate

Akun toiminta perustuu sähkökemialliseen pariin, jossa on anodi ja katodi. Elektronit siirtyvät elektrolyytin välityksellä elektrolyysireaktiossa anodilta katodille synnyttäen virtaa. Reaktiossa anodi hapettuu ja katodi pelkistyy. Ladattaessa akkua reaktio on päinvastainen. Akku toimii sähkökemiallisesti ja käyttöiän määrää sen sisältämä kemiallinen potentiaali. Kuvassa 10 on esitetty akun toimintaperiaate. [27; 28.]



Kuva 10. Akun toimintaperiaate [28].

Hybridisovelluksissa akut voivat tarkoittaa kahta asiaa, ensinnäkin joko oma energialähde dieselmoottorin kanssa. Toinen vaihtoehto on, että akkuja käytetään tukemaan muita energialähteitä. Akkujen lataus tapahtuu joko generaattorilla tai satamassa olevan sähköverkon kautta.

Jos käytössä on useampi akku, kytketään akut joko rinnan tai sarjaan riippuen järjestelmän vaatimuksista. Rinnankytkennässä negatiivinen napa yhdistetään negatiiviseen napaan ja positiivinen napa positiiviseen, jolloin kapasiteetti kasvaa ja jännite pysyy samana. Sarjaankytkennässä yhdistetään negatiivinen napa positiiviseen, jolloin jännite kasvaa ja kapasiteetti pysyy samana. Akkukytkennoissä tulee akkujen olla yhtä suuria. [27.]

Akkuja valittaessa otetaan huomioon akun käyttötarkoitus, käytettävissä oleva tila, sekä akuilta vaadittava energian tarve. Muita akkujen valitsemiskriteereitä ovat akkujen elinikä, paino sekä hinta. Akkujen elinikä määräytyy pääsääntöisesti latauskertojen määrän mukaan.

Tässä työssä on tutkittu lyijyakkuja, litium-ioniakkuja, nikkeli-kadmiumakkuja, natriumrikkiakkuja sekä virtausakkuja, sillä ne ovat varteenotettavimmat akkutekniikat laivasovelluksiin tällä hetkellä sekä lähitulevaisuudessa. Muita tulevaisuuden akkutekniikoita ovat epävakaaat litium-ilma-akut sekä suola-akut, joita ovat esimerkiksi natriumakut.

4.2 Lyijyakku

Perinteinen lyijyakku on hyvä valinta, kun haetaan halpaa akkua. Lyijyakkujen hintaan vaikuttaa niiden yksinkertainen rakenne, pitkä tuotanto sekä pitkälle viety kierrätys. Lyijyakut ovat vielä eniten käytössä olevia akkuja. Niitä on paljon erikokoisia eri kapasiteettivaatimuksia varten. Lyijyakku kestää 1 200–1 800 latauskertaa. Lyijyakkujen elektrodina on kaksi lyijylevyä. Täydessä akussa anodina on lyijyoksidilevy ja katodina lyijylevy sekä elektrolyytinä H_2SO_4 . Tyhjässä akussa molemmissa levyissä on lyijysulfaattia. Akun yhden kennon nimellisjännite on 2,1 V. Sen energiatiheys on 30 Wh/kg. Lyijyakkujen käyttöaika laskee, kun akussa muodostuu lyijyoksidifaasia, mitä ei saada rikottua latauksella. Lyijyoksidifaasin takia elektrodi passivoituu. Lyijyoksidifaasin muodostuminen tapahtuu epäpuhtauksien takia. Lisäksi akut tarvitsevat ylläpitolatausta, sillä ne purkautuvat itsestään. Itsepurkautuminen on 2–5 % akun kapasiteetista kuu-kaudessa ja se on suurempaa alhaisissa lämpötiloissa. Lyijyakut ovat isoja ja painavia, johtuen lyijyn kemiallisista ominaisuuksista. Lisäksi akku on käytön jälkeen ongelmajätettä, koska lyijyakkujen sisältämä lyijy on ympäristölle haitallista. Lyijyakun käyttölämpötila on $-20 - +60\text{ }^\circ\text{C}$. Lyijyakkua ei saa päästää koskaan purkautumaan täysin tyhjäksi, se on ladattava viimeistään, kun akun varauksesta on 20 % jäljellä. [17; 18; 19; 22.]

4.3 Litium-ioniakku

Litium-ioniakkujen kehitys alkoi, kun havaittiin, että akkujen jatkuvat lataus- sekä purkaussyklit aiheuttavat kiteitä anodiin. Litium-ioniakut ovat lyijyakkuja pidempi-ikäisiä, kevyempiä sekä pienempiä fyysiseltä kooltaan. Tämä johtuu litiumin kemiallisista ominaisuuksista. Ne ovatkin yleistyneet sähköautoissa ja ovat myös potentiaalinen energialähde hybridisovelluksiin laivoissa. Litium-ioniakuissa katodi koostuu litiummetallioksidista ja anodi koostuu hiilestä. Litium-ioniakkujen kennon nimellisjännite on keskimäärin 3,6 V ja energiatiheys on 90–190 Wh/kg. [18; 20.]

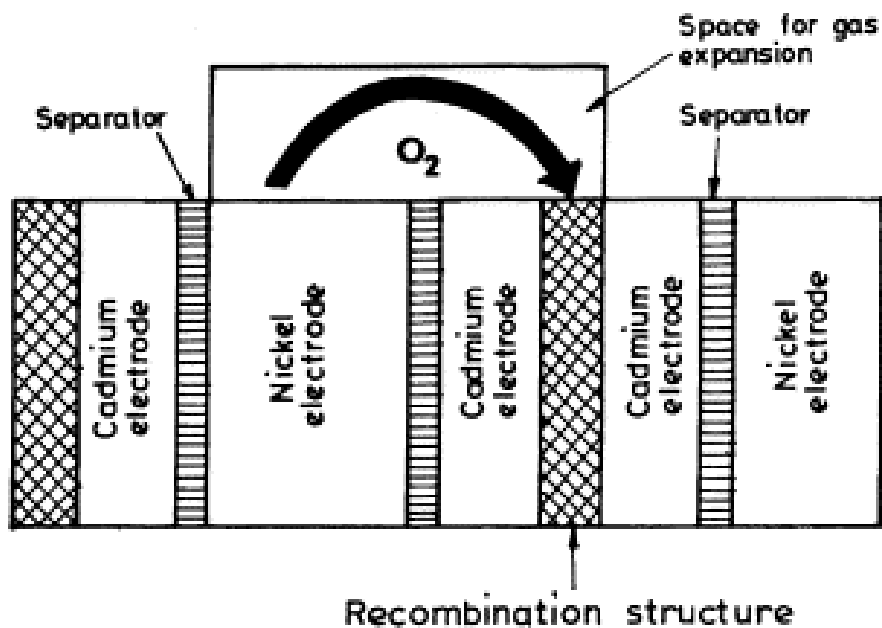
Litium-ioniakut eivät vaadi ylläpitolatausta, koska niiden itsepurkautuminen on pieni. Niissä ei ole muisti-ilmiötä. Litium-ioniakkujen huono puoli on kallis hinta, tarkat vaatimukset ympäristön lämpötilan suhteen, ylläpitoon vaara sekä litiumin terveysvaikutukset. Akkuissa pyritään hyvään energiatihyteen mahdollisimman ohuiden erottimien avulla. Litium-ioniakuissa on paljon energiaa, minkä takia niihin on sisäänrakennettu turvajärjestelmä. Litium-ioniakkuja ei saa ladata yli, mikä on yleensä otettu huomioon laturissa. Akku kehittää vioittuessaan lämpöä, joka synnyttää räjähdysvaaran. Litium-ioniakku aiheuttaa räjähdysvaaran myös kennon oikosulkutilanteessa, jolloin lämpötilan kasvun seurauksena kenno pullistuu. Paineen vapautuessa on vaarana, että lämpö siirtyy seuraavaan kennoon aiheuttaen ketjureaktion, minkä takia akkujen väliin laitetaan yleensä välilevyjä estämään suurempia ketjureaktioita. Litium-ioniakku kestää noin 3 000 latauskertaa. Litium-ioniakkujen kapasiteetista on enintään 80 % käytettävissä. Akkua ei saa päästää purkautumaan liian tyhjäksi, sillä sen elinikä lyhenee merkittävästi. Litium-ioniakun käyttölämpötila on -10 – +50 °C. Ladattaessa akkua alle 0 °C lämpötilassa anodille muodostuu litium-metallikalvo, joka on pysyvä muutos ja tekee akusta epävaakaan. Akkujen alhainen toimintalämpötila on otettava huomioon arktisten alusten eristyksiä sekä akkujen sijoittelua suunniteltaessa. Litium-ioniakut ovat vielä kallis akkuteknikka johtuen niiden kennomaisesta rakenteesta sekä litiumin hinnasta. [18; 20; 21.]

Litium-ioniakkuja on erityyppisiä ja ne eroavat toisistaan katodimateriaalin suhteen. Yleisimpiä katodimateriaaleja ovat litiumkobolttioksidi, litiumrautafosfaatti sekä litiummangaanioksidi. Litiumkobolttiakussa on hyvä energiatiheys. Sen kennojännite on 3,6 V. Huonona puolena on, että ne ovat epästabiileja. Litiumrautafosfaattiakuilla on huono energiatiheys. Niiden kennojännite on 3,3 V. Litiumrautafosfaattiakut ovat stabiili-

leja. Litiummangaaniakuilla on keskiverto energiatiheys. Litiummangaaniakkujen kennojännite on 3,8 V ja ne ovat melko stabiileja. [20.]

4.4 Nikkeli-kadmiumakku

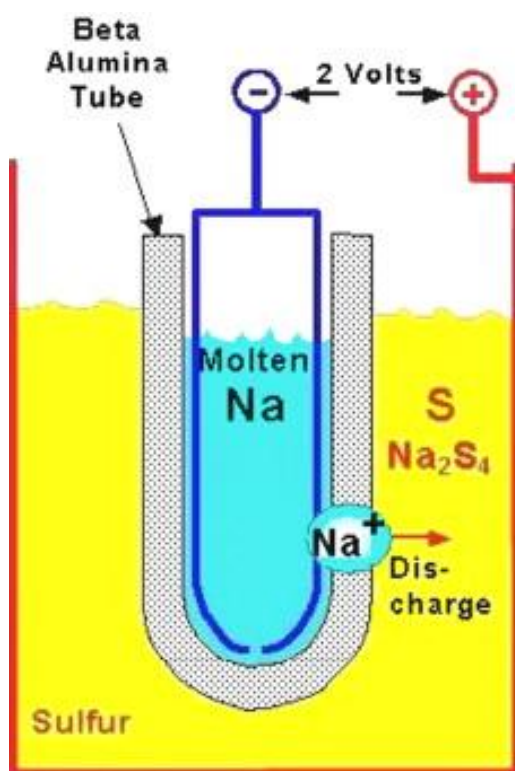
Nikkeli-kadmiumakussa, eli perinteisessä akussa on purettaessa anodina kadmiumhydroksidi ja katodina NiOOH. Nikkeli-kadmiumakussa elektrolyytinä toimii KOH. Ne kestävät 3 000 latauskertaa. Nikkeli-kadmiumakut ovat kalliita kennorakenteeseen perustuvia akkuja. Niiden itsepurkautuminen on 15–20 % akun kapasiteetista kuukaudessa. Nikkeli-kadmiumakkujen huonona puolena on muisti-ilmiö, eli kun akkua ei päästetä purkautumaan välillä tyhjäksi, sen käyttöaika laskee. Muisti-ilmiö johtuu elektrodin pinnalle muodostuvasta passivoivasta kerroksesta, joka haittaa kennoreaktiota. Nikkeli-kadmiumakun kennon nimellisjännite on 1,2 V ja energiatiheys on 80 Wh/kg. Niiden toimintalämpötila on 10–45 °C. Lisäksi kadmium on myrkyllistä, joten nikkeli-kadmiumakut ovat käytön jälkeen ongelmajätettä. Kuvassa 11 on nikkeli-kadmiumakun rakenne. [17; 18; 23.]



Kuva 11. Nikkeli-kadmiumakun rakenne [23].

4.5 Natrium-rikkiakku

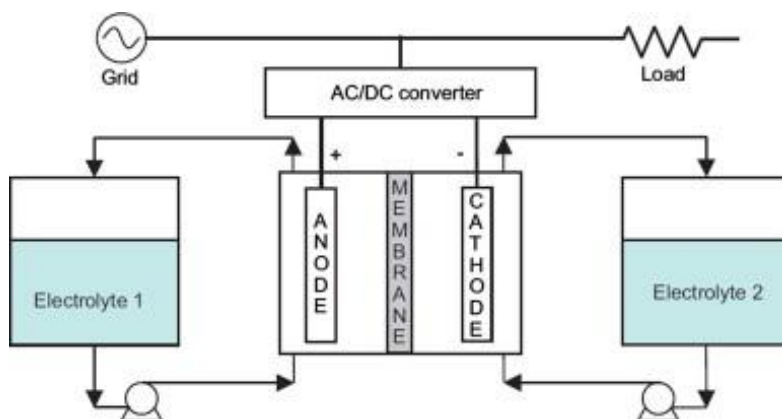
Natrium-rikkiakut ovat uutta akkutekniikkaa, niiden kehitys on aloitettu 1980-luvulla. Kuvassa 12 on natrium-rikkiakun rakenne ja toimintaperiaate. Niiden anodina on nestemäinen rikki ja katodina nestemäinen natrium. Natrium-rikkiakuissa on elektrolyytinä sekä aineiden erottimena keraaminen β - Al_2O_3 -levy. Natriumin ja rikin elektrokemiallinen reaktio muodostaa natriumpolysulfidia. Koska natriumpolysulfidi on nestemäisessä olomuodossa, ovat elektrodit korkeasti reaktiivisia, mikä mahdollistaa akun hyvän energia- ja tehotiheyden. Akun kennon nimellisjännite on 2 V. Natrium-rikkiakut toimivat korkeissa lämpötiloissa, jopa 300–350 °C. Korkea käyttölämpötila on niiden huono puoli, sillä reaktio ei tapahdu alle 300 °C:ssa eli akut kuluttavat energiaa toimiakseen. Natrium-rikkiakuissa on käytettävissä 100 % akun kapasiteetista. Ne ovat stabiileja sekä turvallisia, eivätkä ne itsepurkaudu. Natrium-rikkiakkujen energiatiheys on 100 Wh/kg. Ne ovat pitkäikäisiä akkuja, jotka kestävät 2 500 latauskertaa. [17; 18; 24.]



Kuva 12. Natrium-rikkiakun rakenne [18].

4.6 Virtausakku

Virtausakku on tuorein ja lupaavin akkutekniikka. Se edustaa lähes samaa tekniikkaa kuin regeneroivat polttokennot. Ne koostuvat kahdesta elektrolyyttisäiliöstä sekä kennoista. Kuvassa 13 on virtausakun toimintaperiaate. Virtausakkujen elektrolyytit voidaan vaihtaa tai regeneroida. Yleisimpiä elektrolyyttejä ovat ZnBr, VBr ja NaBr. Nestemäiset elektrolyytit kiertävät säiliöstä kennoon ja takaisin. Kenno koostuu anodista, katodista sekä ioninvaihtokalvosta. Elektrolyytit kiertävät omilla kennoillaan. Elektronien vaihto tapahtuu kalvon läpi. [17; 18.]



Kuva 13. Virtausakun toimintaperiaate [18].

Virtausakkuja ovat muun muassa redox-akut, eli hapetus-pelkistysakut. Redox-akuissa energia on varastoitu positiiviseen ja negatiiviseen elektrolyyttiin. Elektrolyyttiä kierrätetään pumppaamalla tankilta kennoille, jossa atominvaihto, eli valenssi tapahtuu. Tämä johtaa varautumiseen sekä purkautumiseen. Redox-akuissa voi olla useita kennoja, joissa elektrolyytti pääsee kiertämään. Elektrolyytin ollessa kaikissa kennoissa sama, pysyy jokaisen kennon varausastekin samana. [17.]

Virtausakun sijoittaminen on joustavaa, koska säiliöiden ei tarvitse sijaita samassa tilassa kennon kanssa. Virtausakkujen teho määräytyy kennon rakenteen perusteella ja energiakapasiteetti määräytyy elektrolyyttisäiliöiden koon perusteella. [17.]

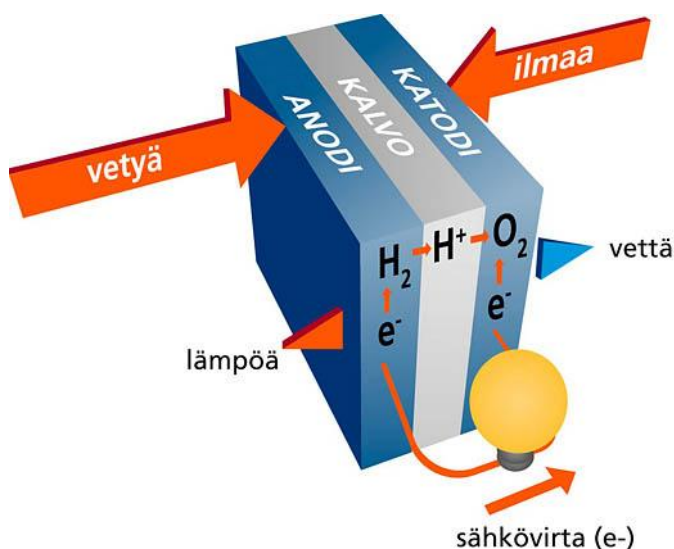
5 Energialähteet

Hybridijärjestelmissä eri energialähteet mitoitetetaan laivajärjestelmien tarvitseman tehon mukaan. Lisäksi laivan pääsääntöinen toiminta tulee huomioida energialähteitä valittaessa, jotta saadaan optimoitua oikea energialähde kuhunkin käyttötarkoitukseen.

5.1 Polttokenno

Polttokennot ovat vanha keksintö 1800-luvun alusta. Niiden suurin kehitys tapahtui Yhdysvaltojen avaruushjelman myötä. Polttokennotekniikan kehittymisen suurimmat haasteet ovat olleet materiaalitekniisiä. Polttokennot ovat nykyään kokeiluasteella laivoissa. Tämän takia niiden luotettavuus on vielä laivakäytössä kysymysmerkki. Myös kallis hinta on niiden ongelma. Lisäksi polttokennojen polttoaineen jakeluverkosto pitää rakentaa ennen, kuin ne tulevat yleistymään. [17; 25.]

Rakenteeltaan polttokennot muistuttavat akkuja, mutta toiminta perustuu kennoon tuotavan aineen reaktioon. Polttokennot toimivat, kun anodiin tuodaan poltettavaa ainetta, kuten vetyä, metanolia tai maakaasua ja katodiin tuodaan ilmaa. Anodilla polttoaine hapettuu ja tästä vapautuvat elektronit tuodaan elektrodilta katodille, missä ilma pelkistyy. Polttokennossa oleva kalvo toimii anodin ja katodin erottimena ja estää polttoaineen palamisen. Kalvo päästää läpi vetyionin, eli protonin. Lopputuotteena syntyy vettä ja sähköä. Polttokennon toimintaperiaate on esitetty kuvassa 14. Kennosta riippuen lopputuotteena tulee myös hiilidioksidia sekä hiilimonoksidia. Päästöt ovat kuitenkin huomattavasti alhaisemmat kuin perinteisessä polttomoottorissa. Elektrolyytti määrittää polttokennon toimintalämpötilan. Polttokennot eivät toimi polttaen polttoainetta, vaan täysin kemiallisesti. Kennosta riippuen käytetään reaktion kiihdyttämiseen katalyyttejä. Toisin kuin akkuja, polttokennoja ei tarvitse ladata. Ne toimivat niin kauan, kuin niihin tuodaan polttoainetta. Polttokennoilla on parempi hyötysuhde kuin millään muulla elektrokemiallisella laitteella. [22; 25; 29.]

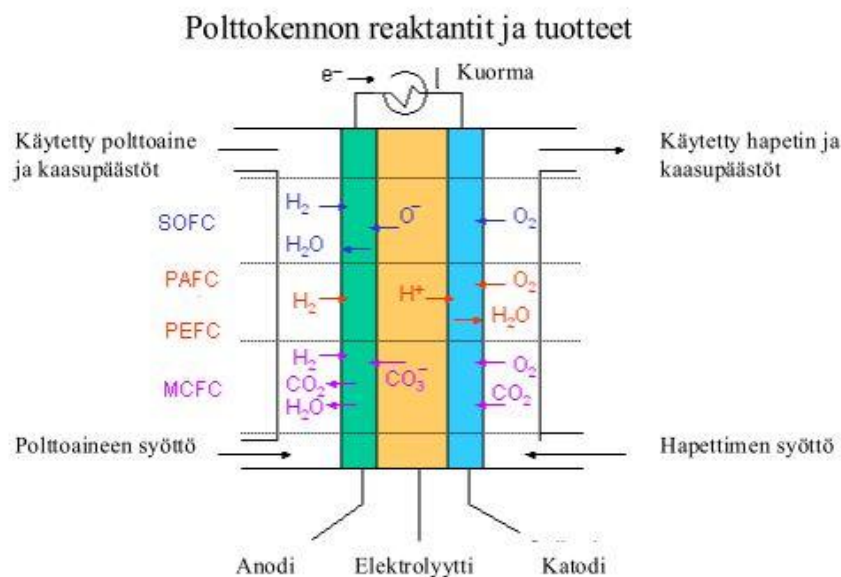


Kuva 14. Polttokennon toimintaperiaate [29].

Polttokennot voidaan jakaa 6 päätyyppiin, jotka ovat alkalipolttokenno (AFC), protoninvaihtopolttokenno (PEMFC), fosforihappopolttokenno (PAFC), sulakarbonaattipolttokenno (MCFC), kiinteäoksidipolttokenno (SOFC) ja suorametanolipolttokenno (DMFC). Kyseiset polttokennot eroavat toisistaan anodiin tuotavan aineen suhteen sekä elektrolyytin ja katalyytin suhteen. Lisäksi kennojen toimintalämpötilat eroavat paljon toisistaan. Sulakarbonaatti- ja kiinteäoksidipolttokennojen etuna on niiden halvempi katalyytti, kuin muilla polttokennoilla. Sulakarbonaatti- ja kiinteäoksidipolttokennot käyttävät useita eri polttoaineita, joista maakaasu on käytössä myös LNG-moottoreissa. Sulakarbonaatti- ja kiinteäoksidipolttokennoilla on hidas käynnistyminen johtuen niiden korkeasta toimintalämpötilasta. Alkalipolttokennot ovat tehokkaita polttokennoja, mutta niiden elektrolyytti on herkkä hiilidioksidille. Tämän takia alkalipolttokennoissa tarvitaan erillistä puhdistuslaitteistoa. Puhdistuslaitteiston hinnan takia ne eivät ole varteenotettava vaihtoehto laivasovelluksiin. Fosforihappopolttokennot ovat korkean hyötysuhteen omaavia polttokennoja. Niiden huono puoli on tehotiheys, minkä takia ne eivät sovellu laivoihin. Protoninvaihtopolttokennolla on suuri tehoalue. Niiden reaktio käynnistyy nopeasti, mutta ne tarvitsevat kalliin katalyytin toimiakseen. Suorametanolipolttokennot perustuvat protoninvaihtopolttokennoihin. Niissä käytetään polttoaineena metanolia ja niissä on hyvä hyötysuhde. Laivasovelluksiin suorametanolipolttokennot eivät sovellu vielä tänä päivänä johtuen niiden heikosta tehoalueesta. Nykyään polttokennoista protoninvaihto-, kiinteäoksidi- sekä sulakarbonaattipolttokennot ovat parhaiten laivoihin soveltuvia polttokennotyyppejä. Tämän takia tässä työssä on keskitytty näihin kolmeen polttokennotyyppiin. Taulukossa 1 on esitetty eri polttokennojen ominaisuuksia. Kuvassa 15 on esitetty polttokennojen kemiallisia reaktioita. [22; 25; 29.]

Taulukko 1. Polttokennojen ominaisuuksia [17; 37].

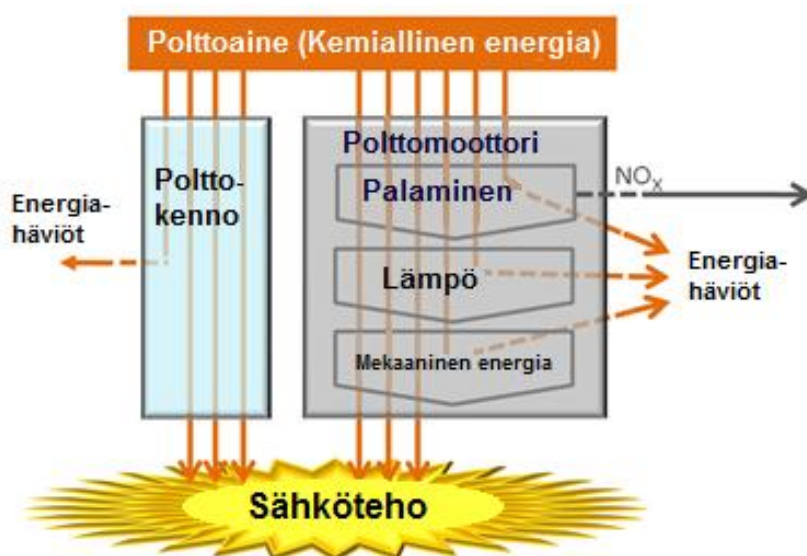
	Alkali-polttokenno (AFC)	Protonin-vaihto-polttokenno (PEMFC)	Fosforihappopolttokenno (PAFC)	Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)	Kiinteä-oksidi-polttokenno (SOFC)	Suora-metanoli-polttokenno (DMFC)
Toimintalämpötila	65–250 °C	80–100 °C	160–250 °C	650 °C	750–1 000 °C	50–90 °C
Hyötysuhde	89 %	40–50 %	40–50 %	50–60 %	45–55 %	70 %
Teho	300 W–5 kW	100 W–10 MW	0–200 kW (11 MW)	0–2 MW (100 MW)	0–220 kW	1–100 kW
Katalyytti	Platina	Platina	Platina	Nikkeli	Nikkeli	Platina, ruteeni
Polttoaine	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CO	H ₂ , CO, CH ₄	Metanoli
Käyttökohde	Avaruustekniikka, sotatekniikka	Sähkönjakelu, kannettavat, kuljetus	Sähkönjakelu, kuljetus	Sähkönjakelu	Sähkönjakelu	Kulutus tuotteet, kuljetus



Kuva 15. Polttokennojen kemiallisia reaktioita [17].

Polttokennojen hyvänä puolena on, että niissä ei ole liikkuvia osia. Liikkuvien osien puuttuminen parantaa energiatehokkuutta sekä vähentää huollon tarvetta. Polttokennon kokonaisteho muodostuu sähkötehosta sekä ympäristöön siirtyvästä lämpötehosta. Kuvassa 16 on esitetty polttokennon sekä polttomoottorin energiahäviöiden syitä. Kuvasta nähdään, että polttokennossa on vähemmän energiahäviökohteita, mikä johtaa parempaan hyötysuhteeseen. Polttokennojen huonoja puolia ovat kennon myrkytyminen, degradaatio, korkeissa lämpötiloissa toimivien polttokennojen hidas käynnistymisaika sekä hinta. Lisäksi polttoaineen jakeluverkosto sekä vedyn varastointi ovat

vielä polttokennojen ongelmia. Kennon myrkyttymisellä tarkoitetaan katalyytin peittymistä epäpuhtauksilla, mikä tapahtuu epäpuhtaan polttoaineen takia. Degradaatiolla eli deaktivoitumisella tarkoitetaan polttokennon käyttöiän laskemista. Degradaatio voi johtua mekaanisista tai kemiallisista syistä. Mekaaninen syy degradaatioon voi olla valmistusteknillinen tai väärin asennettu kalvo. Katalyyttinen myrkyttyminen aiheuttaa kemiallista degradaatiota. Polttokennoissa ei synny lainkaan rikkipäästöjä, joten uusien EU:n rikkidirektiivien myötä polttokennot tulevat yleistymään rikkidirektiivialueen laivoissa tulevaisuudessa. [29; 33; 34; 36.]



Kuva 16. Polttokennon sekä polttomoottorin energiahäviöiden syitä [33].

Polttokenno vaatii toimiakseen oheislaitteita, joita ovat polttokennon lisäksi polttoainejärjestelmä, liitäntäjärjestelmä sekä polttokennon toimintaan tarvittavat tukijärjestelmät. Polttokennon tukijärjestelmiä ovat esimerkiksi ilma- ja vesijärjestelmät. Lisäksi polttokenno tarvitsee toimiakseen kontrollijärjestelmän, jolla valvotaan, ohjataan ja säädetään polttokennon toimintaa. [35.]

Polttokennot, jotka eivät käytä puhdasta vetyä toimiakseen tarvitsevat polttoaineen puhdistukseen reformeria. Reformerilla metaani muutetaan vedyksi, eli reformoidaan. Reformointi tapahtuu höyryreformointina tai osittaishapetuksena. Reformointi voidaan toteuttaa myös autotermisenä reformointina, joka on höyryreformoinnin sekä osittaishapetuksen hybridireaktio. Höyryreformointi on endoterminen reaktio, joka sitoo lämpöä. Höyryreformoinnilla on hidas vasteaika, koska reaktio tarvitsee vettä. Höyryreformoinnilla on hyvä polttoaineen konversiohyötysuhde. Osittaishapetus on eksoterminen reaktio, eli se tuottaa lämpöä. Osittaishapetuksella on nopea vasteaika. Osit-

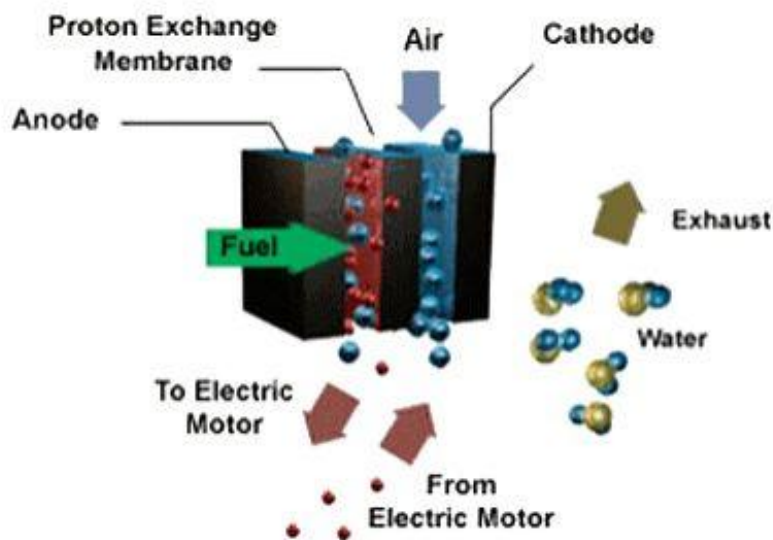
taishapetuksella on höyryreformointia huonompi konversiohyötysuhde, koska tässä reaktiossa aine palaa. Reformerilla tapahtuva reaktio on

höyryreformointi (reaktio kaavana) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ tai

osittaishapetus (reaktio kaavana) $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$. [25; 35.]

5.1.1 Protoninvaihtopolttokenno

Protoninvaihtopolttokenno toimii, kun anodiin tuodaan vetyä ja katodiin happea, jolloin päästönä syntyy vettä. Sähkökemiallinen reaktio tapahtuu elektrodilla, jonka välissä oleva elektrolyyttikalvo päästää vetyionin eli protonin lävitseen. Protoninvaihtopolttokennossa elektrolyytinä on polymeeri, joten niissä ei ole korroosiota. Niiden katalyyttinä toimii yleensä platina. Protoninvaihtopolttokennojen hyvänä puolena on, että niiden reaktio käynnistyy ja pysähtyy nopeasti. Huonona puolena on, että niihin tuotavan vedyn tulee olla puhdasta, ettei elektrodi nokeennu. Protoninvaihtopolttokennot ovat matalissa lämpötiloissa toimivia polttokennoja, joiden toimintalämpötila on 80–100 °C. Kuvassa 17 on esitetty protoninvaihtopolttokennon toimintaperiaate. [17; 29; 37.]



Kuva 17. Protoninvaihtopolttokennon toimintaperiaate [17].

Protoninvaihtopolttokennolla tapahtuvat reaktiot ovat

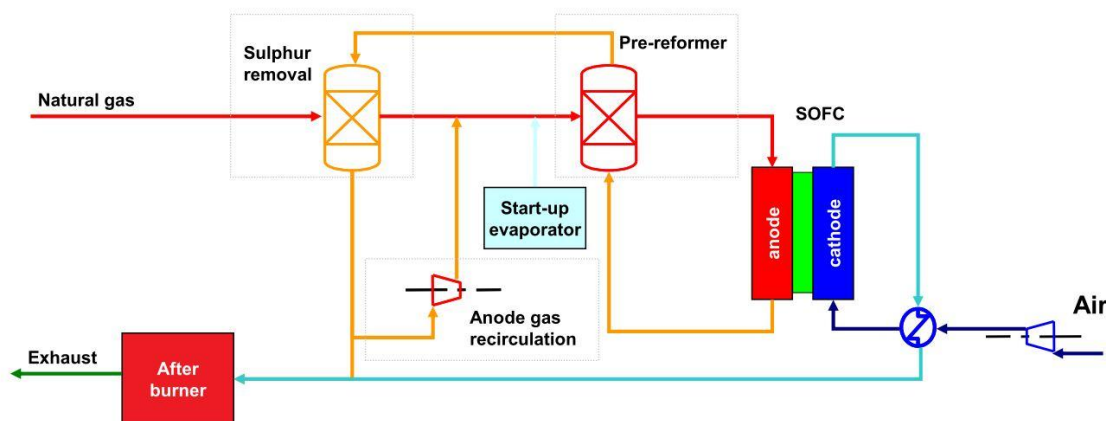
anodilla (reaktio kaavana) $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$,

katodilla (reaktio kaavana) $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ ja

kokonaisreaktio (reaktio kaavana) $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$. [25.]

5.1.2 Kiinteäoksidipolttokenno

Kiinteäoksidipolttokennot käyttävät polttoaineenaan maakaasua tai propaania. Ne ovat korkeissa lämpötiloissa toimivia polttokennoja, joiden toimintalämpötila on 600–1 000 °C. Kiinteäoksidipolttokennojen tyypillinen kokoluokka on 100–300 kW. Ne eivät tarvitse erillistä elektrolyyttiä reaktioonsa. Niiden huonona puolena on, että reaktio käynnistyy hitaasti. Kiinteäoksidipolttokennot ovat hyvä vaihtoehto laivojen apuvoiman tuottamiseen. Kuvassa 18 on kiinteäoksidipolttokennon rakenne sekä toimintaperiaate. Maakaasu tuodaan rikkipesurin kautta reformeriin, josta se viedään anodiin. Katodiin tuodaan ilmaa ja reaktio päättyy jälkipolttimeen synnyttäen polttokennon päästöt. [17; 25; 31.]



Kuva 18. Kiinteäoksidipolttokennon rakenne ja toimintaperiaate [31].

Kiinteäoksidipolttokennon anodilla tapahtuvat kemialliset reaktiot ovat

kun polttoaineena on vety (reaktio kaavana) $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$,

kun polttoaineena on hiilimonoksidi (reaktio kaavana) $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ tai

polttoaineena on metaani (reaktio kaavana) $\text{CH}_4 + 4\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$.

Kiinteäoksidipolttokennon katodilla tapahtuva kemiallinen reaktio on

(reaktio kaavana) $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$.

Kiinteäoksidipolttokennon kokonaisreaktiot ovat

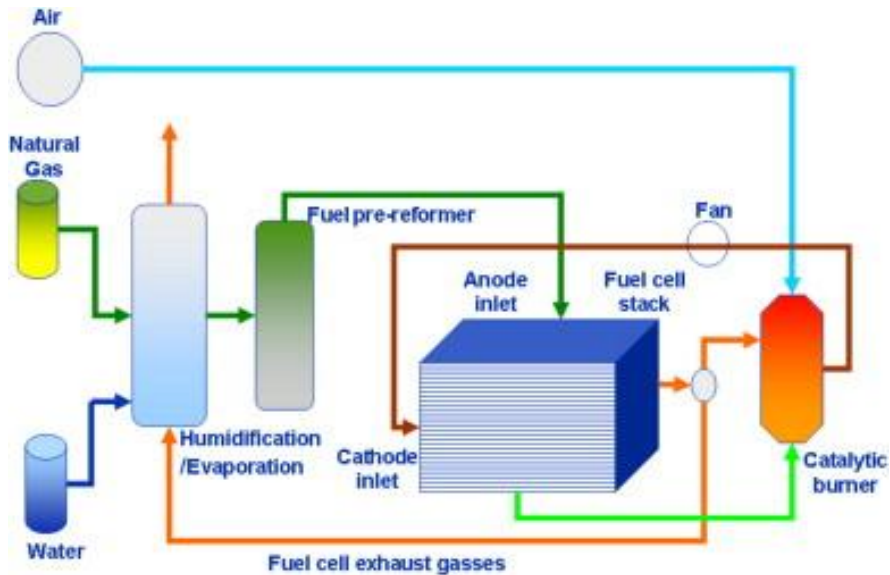
kun polttoaineena on vety (reaktio kaavana) $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$,

kun polttoaineena on hiilimonoksidi (reaktio kaavana) $\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ tai

polttoaineena on metaani (reaktio kaavana) $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. [25.]

5.1.3 Sulakarbonaattipolttokenno

Sulakarbonaattipolttokennot käyttävät polttoaineenaan vetyä, maakaasua, propaania tai dieseliä. Koska sulakarbonaattipolttokennoon on paljon eri polttoainevaihtoehtoja, tämä soveltuu hyvin laivasovelluksiin. Sulakarbonaattipolttokennot toimivat korkeissa lämpötiloissa, jopa 650 °C:ssa. Sulakarbonaattipolttokennon katalyyttinä on sula suola, kuten nitraatti, sulfaatti tai karbonaatti. Kuvassa 19 on sulakarbonaattipolttokennon toimintaperiaate. Tässä sovelluksessa maakaasua ja vettä tuodaan reformerin kautta anodille. Elektrokemiallinen reaktio tapahtuu, kun esivalmisteltu polttoaine sekä ilmalla rikastettu esilämmitetty CO_2 reagoivat. Katalyyttipolttimelle tuodaan reagoimattomat aineet sekä ilmaa. Katalyyttipolttimella palavat loput aineet ja päästöinä syntyy vähän NO_x -päästöjä. Polttimelta syötetään ainetta katodiin, anodiin tuotaessa lisää polttoainetta. [17; 30.]



Kuva 19. Sulakarbonaattipolttokennon rakenne ja toimintaperiaate [30].

Sulakarbonaattipolttokennolla tapahtuvat reaktiot anodilla ovat

kun polttoaineena on vety (reaktio kaavana) $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ tai

polttoaineena on hiilimonoksidi (reaktio kaavana) $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$.

Sulakarbonaattipolttokennon katodireaktio on

(reaktio kaavana) $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$.

Sulakarbonaattipolttokennon kokonaisreaktiot ovat

kun polttoaineena on vety (reaktio kaavana) $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ tai

polttoaineena on hiilimonoksidi (reaktio kaavana) $\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$. [25.]

5.2 Aurinkopaneeli

Aurinkopaneelisovellukset ovat yleistymässä laivoissa saasteettoman energian takia. Lisäksi aurinkopaneelien käyttökustannukset ovat olemattomat. Paneelien huonona puolena on niiden rikkoutumisherkkyys sekä hinta. Aurinkopaneelit vaativat poikkeuksetta akkutekniikkaa energiavarastoksi. Niiden toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa puolijohteessa syntyy sähköä auringon säteilystä. Aurinkopaneeleissa ei ole liikkuvia osia, joten ne ovat huoltovapaita. Niiden elinikä on yli 25 vuotta. [38.]

5.3 Tuulivoima

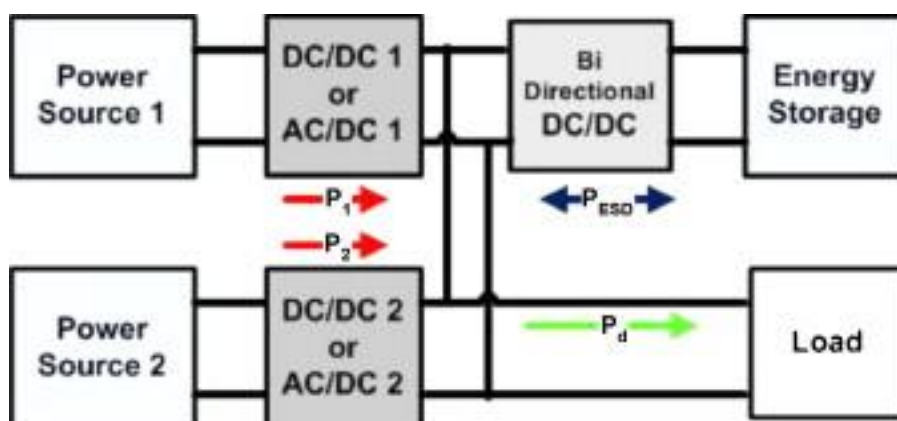
Laivat ovat purjehtineet aikojen alusta asti tuulta hyödyntäen. Purjeet ovat vielä tänä päivänäkin yksi vaihtoehto pienten veneiden liikuttamiseen. Isompiin aluksiin on kiinnitetty purjeita sekä leijoja kulkemisen tueksi, mutta tämän työn tarkoitukseen erillinen purjesovellus ei ole varteenotettava ratkaisu. Hybridisovelluksena tuulivoimalla voitaisiin ainakin teoriassa ladata akkuja tai ottaa tietyn järjestelmän tarvitsema hetkellinen energia. Pelkän tuulivoiman ongelmana on, että tuuli on ajoittaista, minkä takia akut tai polttokenno ovat välttämätön tapa tasoittaa epätasaista tuulen kuormitusta laivan sähköverkkoon. Tuulivoima perustuu kineettisen energian muuntamiseen sähköksi. Tuuli pyörittää voimalan lapoja, jotka pyörittävät turbiinia, jossa generaattori muuttaa liikeenergian sähköksi. Tuulivoimaloiden haittana on niiden suuri koko sekä epätasainen energian tuotto. Näiden haittojen takia tuulienergiasovelluksia ei laivoihin ole tehty. [17.]

6 Hybridijärjestelmät

Hybridijärjestelmien avulla voidaan vähentää päästöjä sekä polttoaineenkulutusta. Dieselmoottori toimii taloudellisimmin silloin, kun sen kuorma on 65–90 %. Kun moottorin kuormitus on 50 % tai alle, polttoaineenkulutus kasvaa nopeasti. Lisäksi alhaisilla kuormituksilla moottori saastuttaa enemmän, kuin optimi kuormituksilla. [39.]

Nykyään on jo useita tapoja kytkeä hybridijärjestelmä ja tätä kautta ottaa käytettävän laitteen tarvitsema virta. Hybridijärjestelmien suunnittelun lähtökohtana on järjestelmään kytkettyjen laitteiden pääsääntöinen käyttötarkoitus. Hybridijärjestelmään liitettyjen laitteiden käyttötarkoituksesta ja kokoonpanosta riippuen kaksi tai useampi energia-

lähde on kytketty järjestelmässä yhteen. Hybridijärjestelmässä energialähteet voidaan kytkeä rinnan tai sarjaan. Kuvassa 20 on esitetty esimerkki hybridijärjestelmän kytkennästä. Kyseisessä järjestelmässä on rinnankytkettynä kaksi tehonlähdettä, joilta otetaan tarvittava virta. Myös energian varastoiminen on otettu huomioon. Kuormitus voi olla propulsiojärjestelmä tai mikä tahansa sähköä kuluttava järjestelmä. Molemmat tai toinen energialähde voi ladata energiavarastoa tässä sovelluksessa. Energian virtauksen suuntaa kontrolloidaan kaksisuuntaisella DC-kytkimellä. [40.]



Kuva 20. Hybridijärjestelmän kytkemisen periaatekuva [40].

Hybridijärjestelmiä voidaan laivoissa käyttää lähes kaikkiin sovelluksiin, jotka käyttävät sähköä. Hybridisovelluksien suurimpana haasteena on kontrolloida tehon virtausta eri energialähteiden sekä käyttölaitteiden välillä. Hyvänä esimerkkinä akkusovellukselle voisi olla valaistus. Maissa ladattavan litium-ioniakuston itsepurkautuminen on pieni ja oikein mitoitettuna siltä saadaan laitteiston tarvitsema virta. Ongelmana tässä sovelluksessa on latausaika maissa. Akkuja voidaan ladata vaihtoehtoisesti merellä, jolloin käytössä on dieselgeneraattori, aurinkopaneeli tai tuulivoima. Polttokennot ovat varteen otettava vaihtoehto akuille. Niiden huonona puolena on erillisten polttoainesäiliöiden tarve. Jotta tila saadaan optimoitua energiatarpeen mukaan, on polttokennoja yleensä tukemassa akusto. Polttokennoista on myös apua pienillä nopeuksilla purjehdittaessa. [41.]

7 Hybridipropulsiojärjestelmä

Hybridipropulsio on tulevaisuuden kannalta tärkein hybriditekniikan soveltamiskohde. Hybridipropulsiota suunniteltaessa kytketään dieselsähköiset energialähteet rinnan tai sarjaan. Sarjaankytketyssä propulsiojärjestelmässä otetaan teho sähkömoottorilta, joka ottaa tarvitsemansa virran dieselmoottorilta tai akuilta, jotka ladataan DC-generaattorilla. Rinnankytketyssä propulsiojärjestelmässä on dieselmoottori, sekä sähkömoottori, joista toinen tai molemmat voivat pyörittää potkuria. Kuvassa 21 on esitetty rinnankytkennän ja sarjaankytkennän periaatekuvat. [42; 43.]



Rinnankytkentä

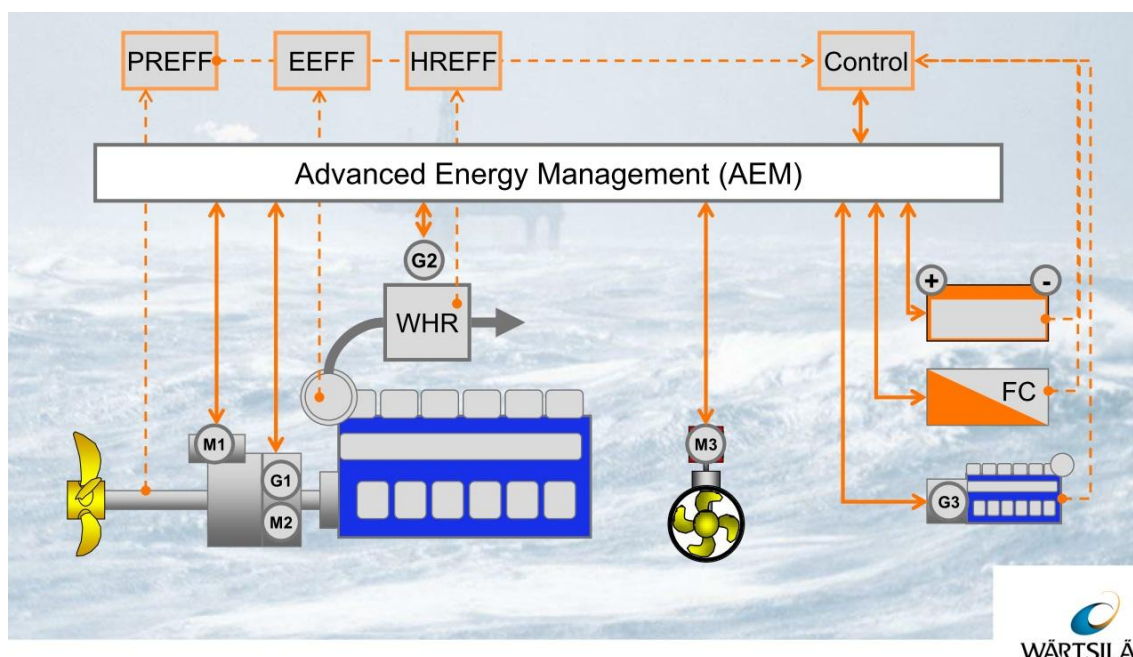


Sarjaankytkentä

Kuva 21. Hybridipropulsion kytkentöjen periaatekuvat [44].

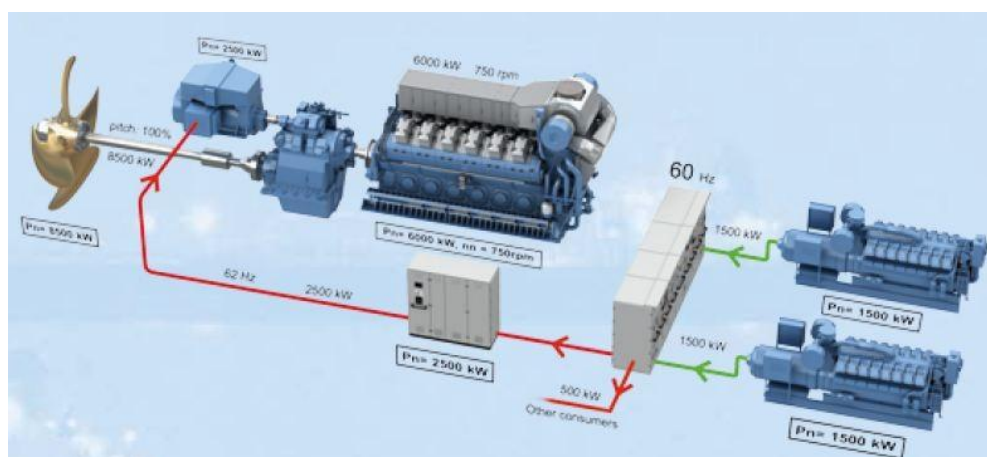
Nykylaivoissa moottori pyörittää generaattoria, jolta otetaan potkuria pyörittävän sähkömoottorin tarvitsema virta. Tähän järjestelmään pystytään suunnittelemaan hybridijärjestelmä tueksi, sillä sähkömoottorille syötettävä virta pystytään ottamaan milta energialähteeltä tahansa. Sähkönjakelu suoritetaan erillisellä yksiköllä, millä säädetään kunkin järjestelmän tarvitsemaa virtaa. [31; 41; 43.]

Kuvassa 22 on periaatekuva siitä, miten Wärtsilä kytkisi propulsiojärjestelmään akuston, polttokennon, generaattorin sekä dieselmoottorin tuottamaan virtaa. Akkujen, polttokennojen sekä generaattorien tuottama virta ohjataan energianhallintajärjestelmän kautta moottorille, joka pyörittää haluttua potkuria. [31.]

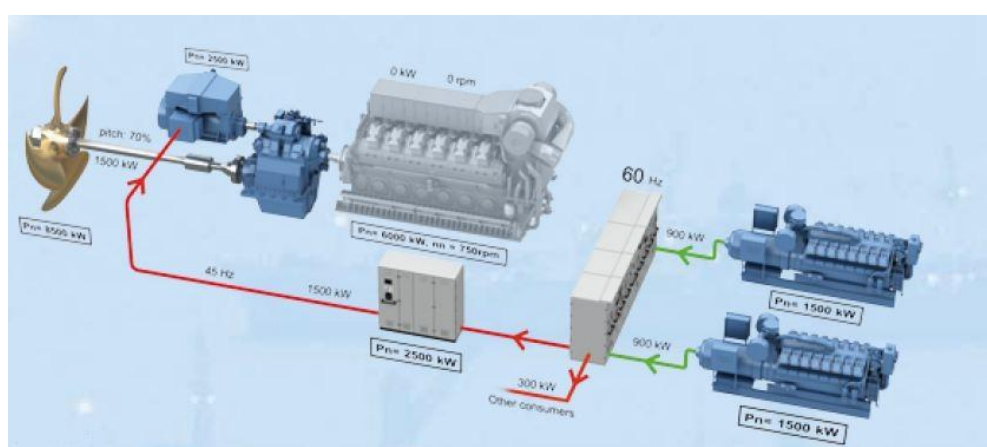


Kuva 22. Hybridijärjestelmän energian käytön periaatekuva [31].

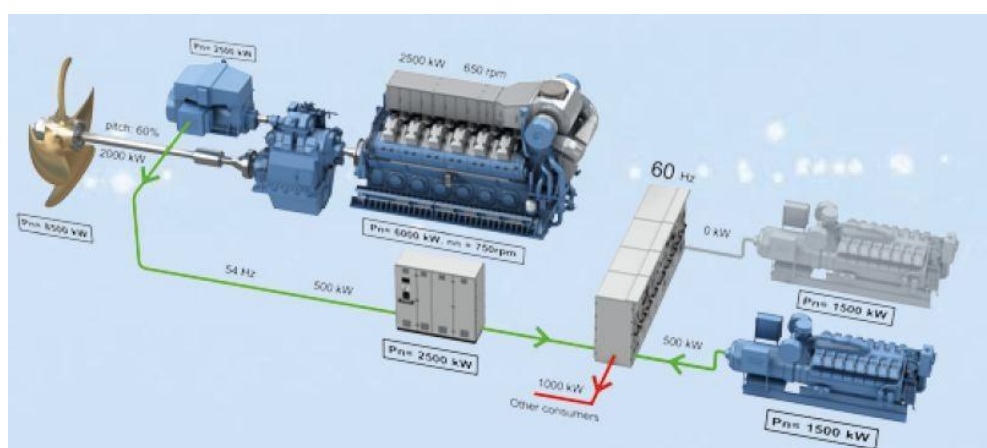
Hybridipropulsion etu perinteiseen propulsiojärjestelmään verrattuna on sen tehon säädettävyys. Säädettävyyden ansiosta dieselmoottori saadaan käymään aina energia- tehokkaimmalla kierrosalueella. Moottoreita ja generaattoreita voidaan käyttää yksin tai yhdessä. Dieselgeneraattorit voidaan korvata akuilla tai virta voidaan tuoda akkujen kautta. Kuvassa 23 on kahden generaattorin sekä yhden moottorin järjestelmä, jonka maksimi potkuriteho on 8 500 kW. Kuvan 23 tapauksessa on käytettävissä moottori sekä molemmat generaattorit. Moottorin pyörimisnopeus on 750 rpm, jolloin koko järjestelmän teho on käytettävissä ja päästään maksiminopeutta. Kuvassa 24 on sama järjestelmä, mutta päämoottori on jätetty pois käytöstä. Propulsioteho on tällöin 1 500 kW. Kolmas vaihtoehto on kuvan 25 mukainen, jossa on käytössä dieselmoottori sekä toinen generaattori. Moottorin pyörimisnopeus on tässä tapauksessa 650 rpm. Propulsiotehoa saadaan 2 000 kW. Neljäs tapa on, että pelkkää dieselmoottoria käytetään, jolloin saadaan propulsiotehoa 3 100 kW. Moottorin pyörimisnopeus on tässä tapauksessa 700 rpm. Tämä vaihtoehto on esitetty kuvassa 26. Viides tapa on satamalataus, jolloin ei käytetä moottoria tai generaattoreita, kuten kuvassa 27. Tällöin kaikki virta menee oheisjärjestelmille ja propulsioteho on 0 kW. [41.]



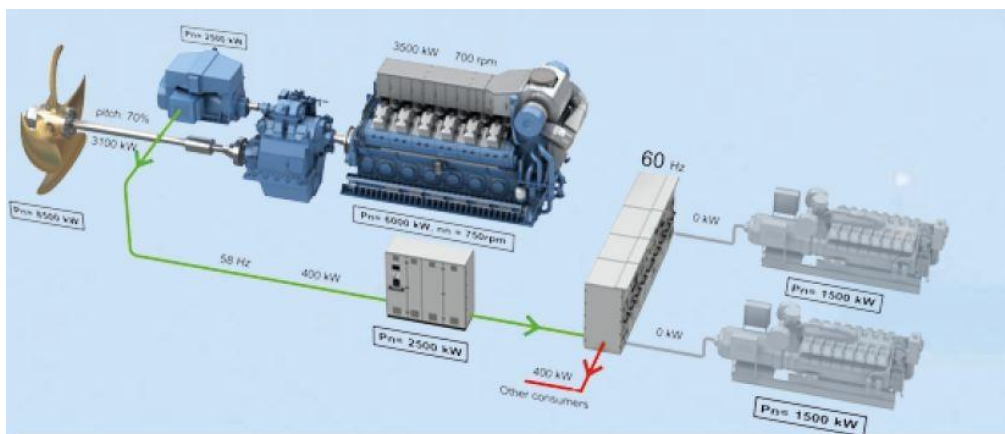
Kuva 23. Dieselmoottori sekä molemmat generaattorit propulsiotehon lähteenä [41].



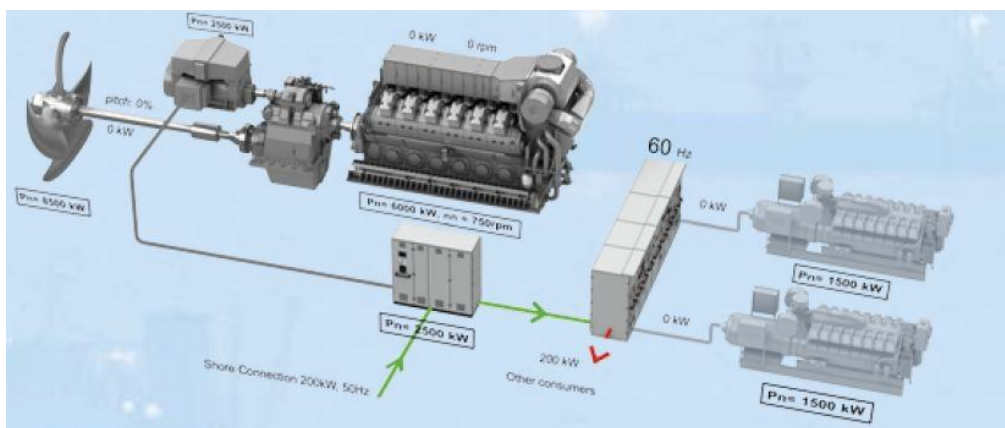
Kuva 24. Generaattorit propulsiotehon lähteenä [41].



Kuva 25. Dieselmoottori propulsiotehon lähteenä sekä toinen generaattori ja dieselmoottori muiden järjestelmien tehonlähteenä [41].

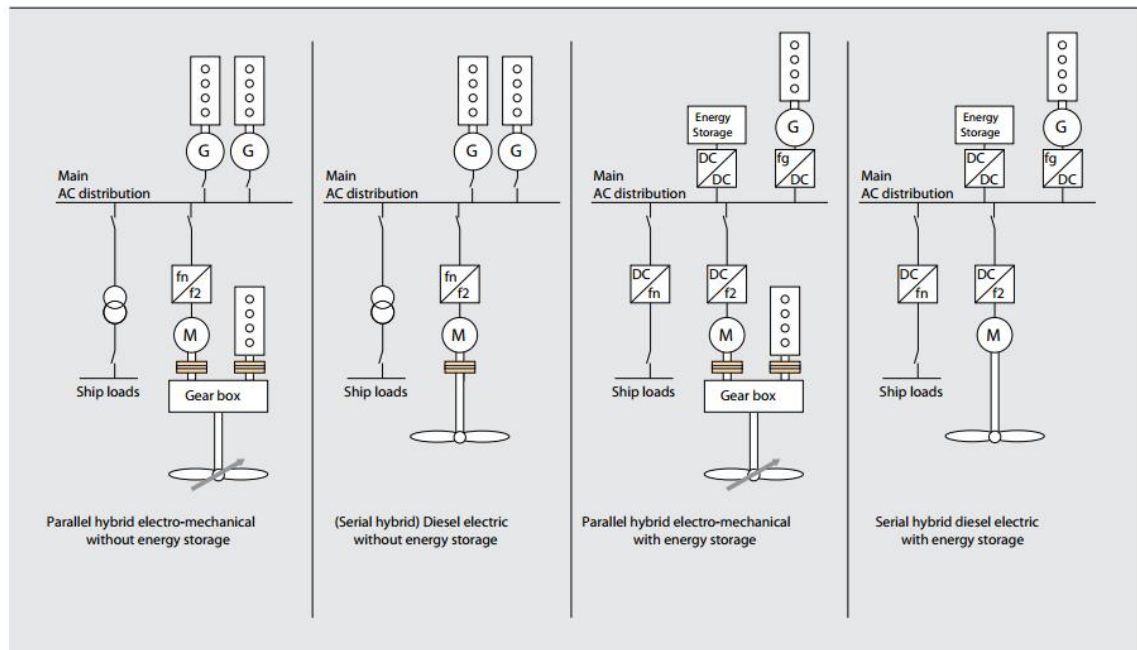


Kuva 26. Dieselmoottori propulsiotehon lähteenä [41].



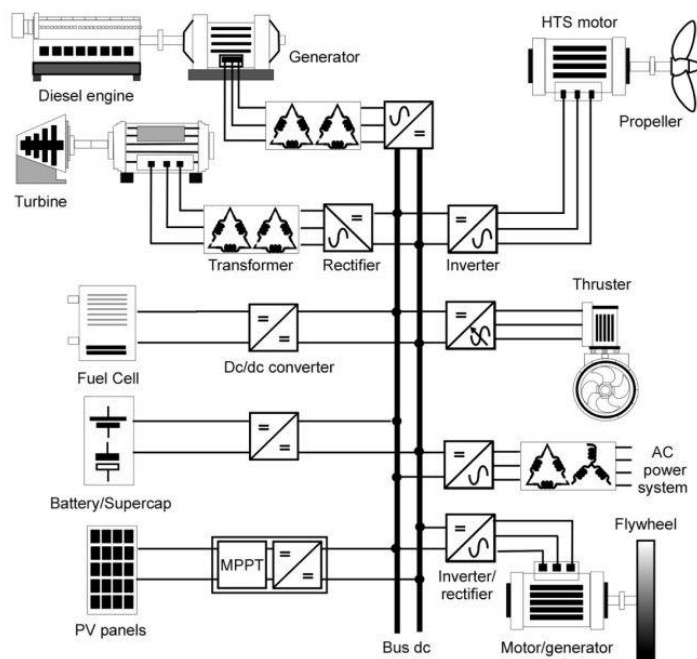
Kuva 27. Satamakäynti [41].

Edellä oleva esimerkki antaa kuvan siitä, että eri nopeuksilla voidaan käyttää energia-
lähteiden eri yhdistelmiä propulsiotehon tuottamiseen. On myös huomioimisen arvoista,
miten paljon muut järjestelmät vievät energiaa tässä sovelluksessa. Kuvan 27 tapaus
sopii EU:n alueella satamassa olon ajaksi. Kuvassa 28 on esitetty eri tapoja kytkeä
dieselmoottori sekä sähkömoottori propulsiojärjestelmään. Kuvan 28 ensimmäinen
kytkentä on vastaava kuin kuvien 23–27 tapaus. Kytkennoistä ensimmäinen ja kolmas
ovat rinnankytkentöjä ja toinen ja neljäs ovat sarjaankytkentöjä. Kolmannessa ja nel-
jännessä kytkennässä on otettu huomioon energiavarasto. Energiavarastojen kytkentä
on laitettu propulsiojärjestelmän sekä muiden laivajärjestelmien väliin, jotta energiava-
rastolta voidaan ottaa laivajärjestelmien tai propulsiojärjestelmän tarvitsema virta. Jos
energiavarastona toimii akusto, niin moottorin tai generaattorin käydessä akustoa voi-
daan ladata. Kolmannen kytkennän päämoottorin ollessa poissa käytöstä voidaan käyt-
tää akustoa generaattorin ohella propulsioyksikön käyttöön. Jos generaattori sekä
päämoottori ovat poissa käytöstä, otetaan propulsioyksikön tarvitsema virta akustolta.
[43.]



Kuva 28. Energiavarastot hybridijärjestelmässä [43].

Kuvassa 29 on esitetty hybridijärjestelmä, jossa on aurinkopaneeli, akusto, vauhtipyörä sekä polttokenno. Kuvassa on esitetty myös laitteiston vaatimia oheisjärjestelmiä. [32.]



Kuva 29. Hybridijärjestelmän kytkentä. [32.]

8 Hybridisovellukset nykylaivoissa

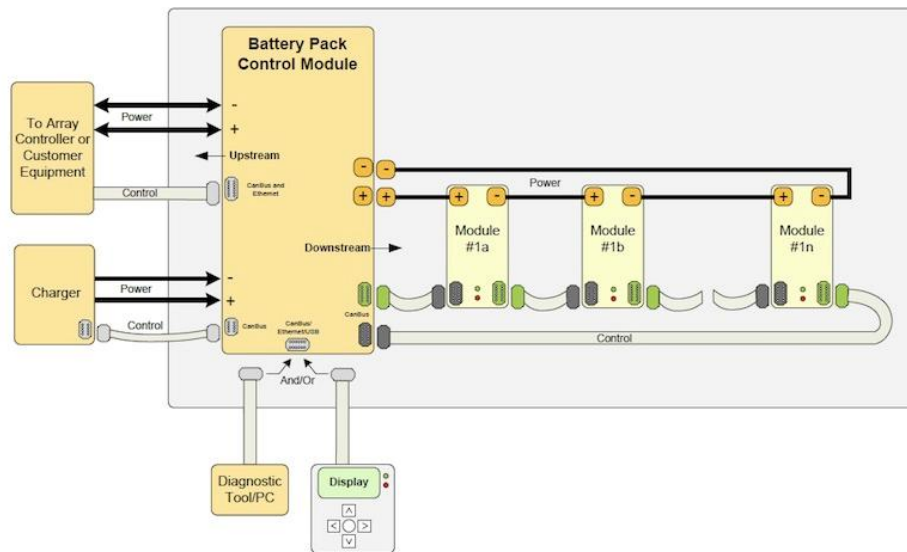
8.1 Viking Lady

Viking Lady (kuva 30) on Norjalaisyritys Eidesvik Offshoren omistama alus. Viking Ladyssä on kansipinta-alaa 945 m^2 , johon voidaan lastata $3\,450 \text{ t}$ painoa. Aluksen paino-lastitankkien koko on $3\,518 \text{ m}^3$, ja siihen mahtuu 993 m^3 puhdasta vettä. Viking Lady on ensimmäinen alus, mihin on asennettu sulakarbonaattipolttokenno. Wärtsilän kehittämä sulakarbonaattipolttokenno tuottaa 92-metrisen aluksen tarvitsemasta energiasta noin 20–30 %. Viking Ladyn polttokenno tuottaa energiaa 330 kW , ja sitä on käytetty $18\,500 \text{ h}$. Polttokennon tankin koko on 167 m^3 . Polttokennon lisäksi Viking Ladyssä on neljä Wärtsilän 6R32DF-dieselmoottoria. Kyseiset moottorit tuottavat $2\,010 \text{ kW}$:n tehon moottoria kohden. Päägeneraattoreina Viking Ladyssä on neljä Alconzan NIR 6391 A-10LWs:ää, jotka tuottavat kukin $1\,950 \text{ kW}$:n tehon. Hätägeneraattorina Viking Ladyssä on Volvon Penta D9-MG-RC, joka pystyy tuottamaan 160 V virtaa. Viking Ladyn propulsiona on kaksi Rolls-Roycen AZP-100FP-potkuriyksikköä. Lisäksi Viking Ladyyn on asennettu $0,5 \text{ MWh}$:n litium-ioniakusto, joka muistuttaa kytkennältään hybridiautojen akustoa. Viking Ladyn akusto on koottu $6,5 \text{ kWh}$ akkumoduuleista. Kyseinen akusto pystyy tuottamaan 5 MW :n tehon lyhyellä ajanjaksolla. Kuvassa 31 on kyseisten akkujen kytkennän periaatekuva. Akut on kytketty sarjaan tässä sovelluksessa. Kuvasta nähdään, että akuston hallinta toimii akkukontrollimoduulin kautta. Päästöjen väheneminen tällä systeemillä on huomattavasti potentiaalisempaa kuin autoissa, johtuen laivan polttoaineenkulutuksesta. [33; 45; 46.]



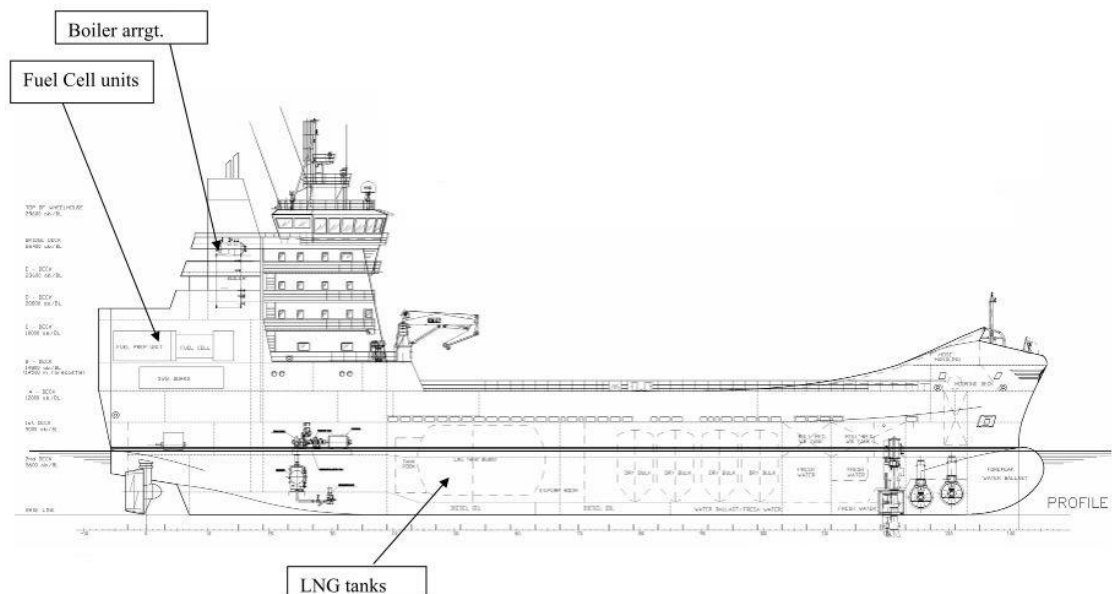
Kuva 30. Viking Lady [45].

Battery Pack Interconnection Diagram



Kuva 31. Viking Ladyn akuston liitännän periaatekuva [33].

Kuvasta 32 käy ilmi Viking Ladyn polttokennon paikka sekä koko suhteutettuna alukseen. Kuvasta käy myös ilmi nestemäisen maakaasun tankkien (LNG tanks) sijoittelu. [47.]



Kuva 32. Viking Ladyn sivuprofiili, suunnitelma [47].

Satama-ajossa polttokenno ja akusto pystyvät tuottamaan tarpeeksi energiaa laivan purjehtimiseen päästöttömästi, minkä takia järjestelmä maksaa itsensä nopeammin

takaisin. Wärtsilän moottorit toimivat biopolttoaineella, joka vähentää päästöjä. Lisäksi säästöjä alukseen on tullut äänen ja värinänvaimennustarpeen pienentymisestä verrattuna pelkillä dieselmoottoreilla toimiviin aluksiin. Viking Ladyn hybridijärjestelmän oletetaan maksavan itsensä takaisin jo alle kahdessa vuodessa. [33; 45; 46.]

8.2 Undine

Undine (kuva 33) on Ruotsalaisyritys Wallenius Linesin omistama ro-ro-alus, joka kuljettaa autoja sekä ihmisiä. Siihen on asennettu merikontin kokoinen Wärtsilän 20 kW:n kiinteäoksidipolttokenno. Undinen polttokenno tuottaa lisäenergiaa alukselle, eli toimii stationäärisenä energialähteenä. Aluksen polttokenno käyttää polttoaineenaan metanolia. Undine on 228 m pitkä ja 32 m leveä alus. [48; 49.]



Kuva 33. Undine [48].

8.3 MV Hallaig

MV Hallaig (kuva 34) on Caledonian Maritime Assets Limitedin (CMAL) hybridialus. Caledonian Maritime Assets Limited on skotlantilainen lauttoja ja satamia omistava yritys. MV Hallaig on ensimmäinen ro-ro-hybridilautta, joka kuljettaa sekä ajoneuvoja että ihmisiä. Aluksen on tarkoitus valmistua kesällä 2013. Siihen mahtuu 23 autoa ja on tilaa 150 matkustajalle. Kyseinen lautta on 43,5 m pitkä sekä 12,2 m leveä. MV Hallaig kulkee noin 8–9 solmun nopeudella. Siinä on kaksi 375 kW:n voith schneider propul-

sioyksikköä, jotka koostuvat viidestä lavasta. MV Hallaigissa on kaksi 350 kW:n litium-ioniakkupakettia, jotka on kytketty propulsiojärjestelmään. Akkujen lataus tapahtuu yön yli. Akkujen paino on 7 000 kg. Tulevaisuudessa on tavoitteena saada akut ladattua myös tuuli-, aurinko- sekä aaltoenergialla. Tämänhetkiselä kytkenällä odotetaan CO₂-päästöjen putoavan 20 %. [50; 51.]



Kuva 34. MV Hallaig [51].

8.4 Japanilaiset autonkuljetusalukset

Japanissa on kehitetty aurinkopaneelisovelluksia aluksiin, joissa ideana on hybridiautojen kuljetus hybridiennergialla. Emerald Ace, Nichioh Maru sekä Auriga Leader ovat lähes samankokoisia aluksia, jotka hyödyntävät aurinkoenergiää.

Emerald Ace (kuva 35) on Mitsui Engineering & Shipbuilding Co:n rakentama alus. Sen tarkoitus on toimia autojen kuljetukseen ja siinä on tilaa 6 400 henkilöautolle 12 kannella. Se on 199 m pitkä sekä 32 m leveä. Emerald Ace on hybridiennergiää käyttävä laivatyyppi, joka on kehitetty kun Japanin telakat eivät pysty kilpailemaan Korean telakoita vastaan hinnassa. Emerald Acen 768 aurinkopaneelia tuottavat 160 kW tehon. Panasonicin aurinkopaneelit lataavat litium-ioniakkuja, joiden kapasiteetti on yhteensä 2,2 MWh. Akut on sijoitettu alimmalle kannelle, jotta ne toimisivat painolastina laivalle. Emerald Acen huippunopeus on 20 solmua. Se on ensimmäinen alus, joka on täysin päästötön maissa latauksen aikana, johtuen aurinkoenergiasta. Emerald Ace on viimeinen Kobe Shipyardsilla rakennettu alus. [52.]



Kuva 35. Emerald Ace [52].

Nichioh Maru (kuva 36) on Nissanin omistama autojenkuljetusalus. Se on 170 m:n pituinen ja 26 m:n levyinen alus, jonka 281 aurinkopaneelia tuottavat 50 kW virtaa. Nichioh Marun aurinkoenergia riittää LED-valoilla toimivaan valaistukseen. Aluksen kuljetuskapasiteetti on 1 380 autoa. Se kulkee 21,2 solmun nopeudella. Nichioh Marun aurinkopaneelit vähentävät polttoaineenkulutusta 1 400 tonnia vuodessa, jota kautta CO₂-päästöt vähenevät 4 200 tonnia vuodessa. [53.]



Kuva 36. Nichioh Maru [53].

Auriga Leader (kuva 37) on Nippon Yussenin omistama Toyotan autojen kuljetukseen tarkoitettu alus. Sen kapasiteetti on 6 200 autoa. Se on 200 m:n pituinen ja 32 m:n levyinen alus, jossa 328 aurinkopaneelia tuottavat 40 kW tehon. Tämä on 1 % laivan

tarvitsemasta energiasta sekä 0,05 % propulsiotehosta. Auriga Leaderissa on nikkeli-vetyakusto, jota aurinkopaneelit lataavat. Aluksen aurinkopaneelit säästävät polttoainenkulutusta 13 tonnia vuodessa, mitä kautta CO₂-päästöt tippuvat 40 tonnia vuodessa. [54; 55.]

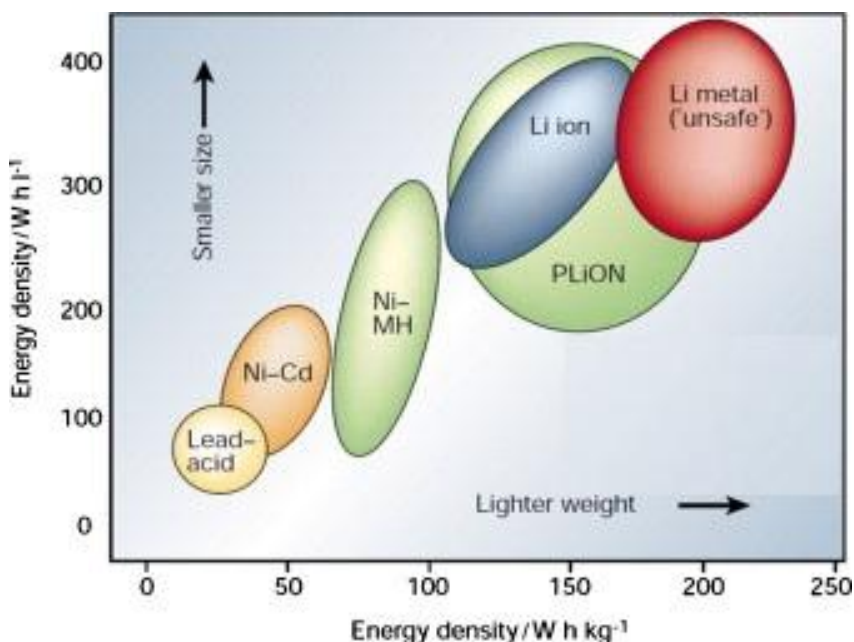


Kuva 37. Auriga Leader [56].

9 Yhteenveto

Tulevaisuudessa tiukkenevat päästöraajat pakottavat laivanrakentajat tutkimaan vielä pidemmälle akkujen ja polttokennojen soveltamismahdollisuuksia. Etenkin akkusovellukset tulevat olemaan EU:n alueella kiinnostava ratkaisu, koska yli kaksi tuntia satamassa olevat alukset, jotka pystyvät sammuttamaan kaikki moottorinsa satamassa ja käyttävät maalla olevaa sähköverkkoa, voivat käyttää enemmän rikkiä sisältävää polttoainetta. [5.]

Kuvassa 38 on vertailtu akkujen energiatiheyyksiä kilogrammaa sekä litraa kohden. Kuvasta käy ilmi, että litium-ioniakku on paras vaihtoehto, kun haetaan kevyttä ja pientä akkua, minkä takia litium-ioniakkuja on sovellettu tänä päivänä auto- ja laivasovelluksiin. Lyijyakku on taas painavin ja suurin akku. Kuvasta nähdään, että nikkeli-kadmiumakut ovat pienempiä kuin lyijyakut, mutta massiivisen kokoisia litium-ioniakkuihin verrattuna. [22.]

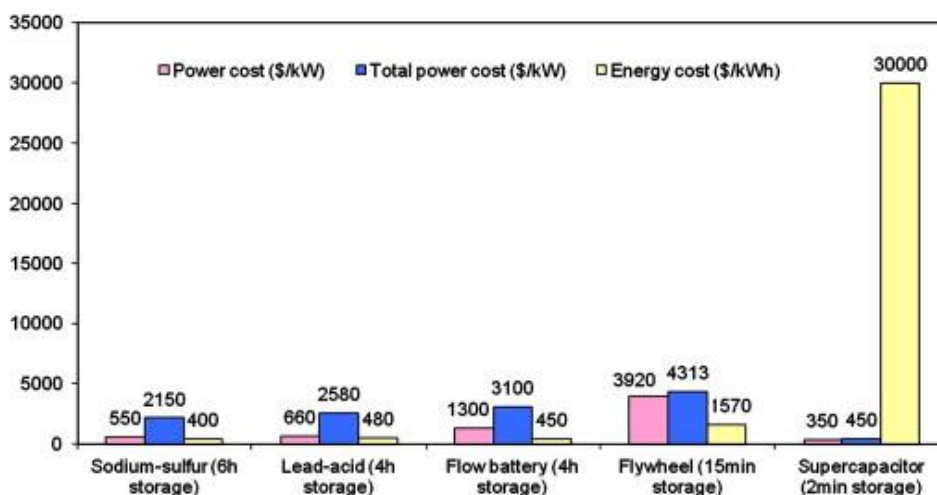


Kuva 38. Akkujen energiatihyysien vertailu [22].

Taulukossa 2 nähdään eri akkujen tämänhetkinen tilanne. Taulukosta käy ilmi, että litium-ioniakut ovat potentiaalisin akkuteknikka laivasovelluksiin. Niiden suurimmat edut muihin akkuteknikoihin nähden ovat energiatihydessä. Taulukosta nähdään, että natrium-rikkiakku on myös potentiaalinen akkuteknikka, jonka etuna on hyvä energiatiheys ja haittana korkea käyttölämpötila. Akkuteknikoiden huonona puolena on potentiaalisten akkutyyppien hinta. Litium-ioniakkujen hinnan tulee pitämään korkeana litiumin heikko saatavuus. Niiden hinnan on kuitenkin oletettu laskevan tulevaisuudessa puoleen nykyisestä hintatasosta. Kuvassa 39 on vertailtu eri energialähteiden hintoja. Kuvasta nähdään, että natrium-rikkiakut ovat halvin energianvarastointitapa. Vauhtipyörät ja kondensaattorit ovat kalliita tunnille laskettuna, johtuen niiden lyhyestä purkautumisajasta. Lyijyakut ja virtausakut ovat kustannuksissa lähellä natrium-rikkiakkujen tasoa. [18; 21.]

Taulukko 2. Akkujen vertailu [17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25].

	Lyijyakku	Litium-ioniakku	Nikkeli-kadmiumakku	Natrium-rikkiakku
Latauskertojen määrä	1 200–1 800	3 000	3 000	2 500
Nimellisjännite	2,1 V	3,6 V	1,2 V	2 V
Energiatiheys/kg	30 Wh/kg	90–190 Wh/kg	80 Wh/kg	100 Wh/kg
Energiatiheys/L	70 Wh/L	570 Wh/L	135 Wh/L	345 Wh/L
Käyttölämpötila	-20 – +60 °C	-10 – +50 °C	10–45 °C	300–350 °C



Kuva 39. Energialähteiden kustannukset [18].

Aurinkopaneelit ovat mielenkiintoinen vaihtoehto, kun haetaan alukselle lisävirtaa akkujen lataamiseksi. Työlaivoissa huonona puolena aurinkopaneelisovellusten kannalta on herkkien aurinkopaneelien sijoittaminen, jotta ne eivät vaurioidu.

Polttokennot ovat vaihtoehto tulevaisuuden energialähteeksi. Polttokennojen huonona puolena on vielä tällä hetkellä vähäinen toimittajien määrä sekä laivoihin soveltuvien polttokennojen kehitys. Viking Ladyn sulakarbonaattipolttokenno on kuitenkin hyvä esimerkki siitä, että polttokennotekniikkaa voitaisiin jo soveltaa laivoihin. Varsinkin sulakarbonaattipolttokennot tulevat olemaan lähitulevaisuudessa käytössä, sillä dieselin ja nestemäisen maakaasun käyttö niiden polttoaineena ei vaadi erillisen polttoaine ja -keluverkoston rakentamista.

Taulukon 2 sekä kuvan 38 perusteella voidaan olettaa, että Viking Ladyn 0,5 MWh:n litium-ioniakusto painaa noin 5 000 kg ja vie noin 2 m³ tilaa. Taulukossa 3 on esitetty hybridialusten tekniikoita ja vertailtu hybriditekniikan etuja toisiinsa nähden. Taulukosta nähdään, että aurinkopaneelisovellukset laivoihin vaativat paljon paneeleita. Aurinkopaneeleilta saatava lisäteho on myös pieni verrattuna polttokennoon tai akustoon. Aurinkopaneeleissa eri tehomäärät selittyvät eri valmistajilla. Viking Lady on vertailluista aluksista ainoa offshore-alus ja lähimpänä tutkittua kokoluokkaa. Viking Ladyn ja MV Hallaigin hybriditekniikoilla saadaan eniten tehoa. Vähiten tehoa alukseen tuottaa Undinen kiinteäoksidipolttokenno.

Taulukko 3. Hybridialusten vertailu [33; 45; 46; 48; 49; 50; 51; 52; 53; 54; 55].

	Viking Lady	Undine	MV Hallaig	Emerald Ace	Nichioh Maru	Auriga Leader
Hybridi-energia-lähde	Sula-karbonaattipolttokenno ja litium-ioniakusto	Kiinteä-oksidi-polttokenno	Litium-ioniakusto	768 aurinko-paneelia	281 aurinko-paneelia	328 aurinko-paneelia
Hybridi-energia-lähteeltä saatava teho	330 kW ja 0,5 MWh	20 kW	350 kW	160 kW	50 kW	40kW
Aluksen koko	92 m	228 m	43,5 m	199 m	170 m	200 m

Lähteet

- 1 TraFi 2012. Merenkulun ilmansuojelumääräykset. Verkkodokumentti. <http://www.trafi.fi/filebank/a/1355837278/135dfb76f87ab9adb9cf2b8e36d9e46d/10925-MARPOL_-koulutusta_paastovalvontaviranomaisille_-_ilmansuojelu_10-12-2012.pdf> Luettu 18.1.2013.
- 2 DNV 2011. Potential Benefits of Hybrid Powertrain Systems for Various Ship Types. Verkkodokumentti. <http://rs-rheve.com/images/C.%20Chryssakis_RHE-VE2011.pdf> Luettu 18.1.2013.
- 3 Tekniikka & Talous 7.9.2012. Rikkidirektiiville löytyi yksi hyötyjäkin. Verkkodokumentti. <<http://www.tekniikkatalous.fi/Liikenne/rikkidirektiiville+loytyi+yksi+hyoty-jakin/a836386>> Luettu 18.1.2013.
- 4 HS 21.2.2013. Suomalaislaivoihin asennettu vain yksi rikkipesuri. Verkkodokumentti. <<http://www.hs.fi/talous/Suomalaislaivoihin+asennettu+vain+yksi+rikkipesuri+/a1361374435877>> Luettu 5.3.2013.
- 5 Euroopan unionin virallinen lehti 2012. Direktiivit. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/33/EU. Verkkodokumentti. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:327:0001:0013:FI:PDF>> Luettu 8.4.2013.
- 6 Wärtsilä. LNG-the Pros & Cons. Verkkosivut. <<http://www.wartsila.com/en/lng-the-pros-and-cons>> Luettu 27.3.2013.
- 7 Hybrid propulsion in Feadship's X-Stream and F-Stream concept designs. Verkkodokumentti. <<http://www.hiswasymposium.com/assets/files/pdf/2009/Hiswa%20Symposium%202008%20Ronno%20Schouten.pdf>> Luettu 30.11.2012.
- 8 ABB. Mikä on Azipod? Verkkodokumentti. <<http://www.abb.fi/cawp/db0003db002698/e4a24895e09f690cc1257291003ef7de.aspx>> Luettu 4.2.2013.
- 9 ABB. Azipod CO Compact podded propulsion in the 1,3–4,5MW power range. Verkkodokumentti. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c93dac76c6f529f7c1257a3300281867/\\$file/Azipod_CO_brochure.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/c93dac76c6f529f7c1257a3300281867/$file/Azipod_CO_brochure.pdf)> Luettu 26.2.2013.
- 10 Rolls-Royce. Rolls-Royce propulsors. Verkkosivut. <<http://www.rolls-royce.com/marine/products/propulsors/>> Luettu 4.2.2013.
- 11 Steerprop. Verkkosivut. <<http://www.steerprop.com/en/products>> Luettu 27.3.2013.

- 12 Offshore-technology.com. Rolls-Royce Marine-Marine Propulsion Systems, Gas Turbines, Pitch Propellers and Azimuth Thrusters. Verkkosivut. <http://www.offshore-technology.com/contractors/power/rolls_royce/rolls_royce2.html> Luettu 17.4.2013.
- 13 Thrustmaster. Azimuth Thrusters. Verkkosivut. <<http://www.thrustmastertexas.com/products/azimuththrusters.html>> Luettu 17.4.2013.
- 14 Powermaster. Verkkosivut. <<http://www.powermastermarine.com/>> Luettu 17.4.2013.
- 15 Wärtsilä 2011. Terje Nordtun. Enhancing Diesel Electric Systems (LLC) for Efficient and Safe OSV Operations.
- 16 Arctech Helsinki Shipyard. Verkkosivut. <<http://arctech.fi/>> Luettu 18.3.2013.
- 17 VTT 2003. Energian varastoinnin nykytila. Verkkodokumentti. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>> Luettu 22.1.2013.
- 18 Elsevier. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 18, February 2013, Pages 390–400. A review of energy storage technologies for marine current energy systems.
- 19 Elsevier. Detchko Pavlov. Lead-Acid Batteries: Science and Technology. A handbook of lead-acid battery technology and its influence on the product.
- 20 AEL 2013. Frans Malmari. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen akkutekniikkaa.
- 21 Diagno Finland Oy 2012. Arto Lehtinen. Akkujen energiatehokkuus.
- 22 Elsevier. Electrochimica Acta Volume 84, 1 December 2012 Pages 235–249. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects.
- 23 Elsevier. Journal of Power Sources Volume 100 Issues 1–2, 30 November 2001, Pages 125–148. Nickel-based rechargeable batteries.
- 24 Elsevier. Solid State Ionics Volume 179, Issues 27–32, 30 September 2008, Pages 1697–1701. Research on sodium sulfur battery for energy storage.
- 25 TKK. Laboratory of advanced energy systems. New&Renewable energy systems group. Verkkosivut. <<http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/fc-kuvaus.html>> Luettu 3.4.2013.

- 26 McGraw Hill Professional. David Linden & Thomas Reddy. Linden's Handbook of Batteries 4 edition.
- 27 Autoalan Koulutuskeskus Oy. Helsinki. Matti Juhala, Arto Lehtinen, Matti Suominen & Kari Tammi. Moottorialan sähköoppi 8. painos 2005.
- 28 TKK. Tietoverkkolaboratorio. Verkkosivut.
<<http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s98/htyo/34/rakenne.shtml>>
Luettu 3.4.2013.
- 29 Teknologiateollisuus. Polttokennot. Verkkosivut.
<<http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/polttokennot-3027.html>>
Luettu 13.2.2013.
- 30 Elsevier. Applied Thermal Engineering Volume 35, March 2012, Pages 15–28. A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell.
- 31 Wärtsilä 2011, Erkkö Fontell. The 8th annual Green Ship Technology Conference. Wärtsilä Fuel Cell Development Program.
- 32 JMR. Future Trends In Electric Propulsion Systems For Commercial Vessels. Verkkodokumentti. <<http://www.jmr.unican.es/pub/00402/0040206.pdf>>
Luettu 5.4.2013.
- 33 Fellowship Viking Lady. Verkkosivut. <<http://vikinglady.no/technology/>>
Luettu 13.2.2013.
- 34 VTT. Matias Halinen. Polttokennot. Verkkodokumentti.
<<http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen107.pdf>> Luettu 5.4.2013.
- 35 VTT. Matias Halinen. Polttokennojärjestelmät. Verkkodokumentti.
<<http://automation.tkk.fi/attach/AS-84-3134/halinen207.pdf>> Luettu 10.4.2013.
- 36 SINTEF. Magnus Thomassen. Degradation of PEM Fuel Cells. Verkkodokumentti. <http://www.vtt.fi/files/projects/Nanoduramea/Nanoduramea_summerschool_2010_Thomassen.pdf> Luettu 5.4.2013.
- 37 Elsevier. International Journal of Hydrogen Energy Volume 34, Issue 12, June 2009, Pages 5242–5248. Design of a PEM fuel cell system for residential application.
- 38 Naps Systems Oy, Jukka Nieminen. Aurinko, ehtymätön energialähde. Verkkodokumentti. <<https://www.vasek.fi/assets/Files/Puurakentamisen-tietopankki/Hajautettu-energiantuotanto/Jukka-Nieminen.pdf>> Luettu 19.2.2013.

- 39 Ulstein 2009. The development of "Ulstein hybrid propulsion concept" and installations on Olympic Zeus and Olympic Hera. Verkkodokumentti. <[http://www.ulstein.com/kunder/ulstein/mm.nsf/lupGraphics/ULSTEIN%20HYBRID%20PROPULSION%20installations%20on%20Olympic%20Zeus%20and%20Olympic%20Hera.pdf](http://www.ulstein.com/kunder/ulstein/mm.nsf/lupGraphics/ULSTEIN%20HYBRID%20PROPULSION%20installations%20on%20Olympic%20Zeus%20and%20Olympic%20Hera.pdf/$file/ULSTEIN%20HYBRID%20PROPULSION%20installations%20on%20Olympic%20Zeus%20and%20Olympic%20Hera.pdf)> Luettu 20.2.2013.
- 40 Elsevier. Journal of Power Sources Volume 196, Issue 3, 1 February 2011, Pages 1599–1607. A reference governor-based hierarchical control for failure mode power management of hybrid power systems for all-electric ships.
- 41 Rolls-Royce. Hybrid shaft generator propulsion system upgrade. Verkkodokumentti. <http://www.rolls-royce.com/Images/hsg_brochure_tcm92-26884.pdf> Luettu 4.2.2013.
- 42 Propulsion Marine. Hybrid Propulsion. Verkkosivut. <<http://www.propulsionmarine.com/hybrid>> Luettu 13.2.2013.
- 43 ABB. Energy efficiency in marine vessels. Verkkodokumentti. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/9c632630a46c06dac1257a8a003ac7dc/\\$file/ABB%20Generations_16%20Energy%20efficiency%20in%20marine%20vessels.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot293.nsf/veritydisplay/9c632630a46c06dac1257a8a003ac7dc/$file/ABB%20Generations_16%20Energy%20efficiency%20in%20marine%20vessels.pdf)> Luettu 8.2.2013.
- 44 David McMullen & Thomas Dalton. Hybrid electric drive-Enhancing energy security.
- 45 Ship-technology.com. Viking Lady Offshore Supply Vessel, Norway. Verkkodokumentti. <<http://www.ship-technology.com/projects/viking-lady/>> Luettu 20.2.2013.
- 46 Wärtsilä. Viking Lady. Verkkosivut. <<http://www.wartsila.com/en/references/Viking-Lady>> Luettu 26.2.2013.
- 47 FellowSHIP. Fuel cells for commercial ships. Verkkodokumentti. <<http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/marineboard/fall08/johnson.pdf>> Luettu 26.2.2013.
- 48 Ecofriend. Wärtsilä Corporation installs SOFC onboard car carrier 'Undine'. Verkkosivut. <<http://www.ecofriend.com/wrtsil-corporation-installs-sofc-onboard-car-carrier-undine.html>> Luettu 1.3.2013.
- 49 Wallenius Lines. M/V Undine, Technical Specifications.
- 50 Ship-technology.com. MV Hallaig Hybrid Ferry, Scotland. Verkkosivut. <<http://www.ship-technology.com/projects/mv-hallaig-hybrid-ferry/>> Luettu 1.3.2013.

- 51 CMAL. Hybrid Ferries Project. Verkkosivut. <<http://www.cmassets.co.uk/en/our-work/projects/current-projects/hybrid-ferries-project.html>> Luettu 1.3.2013.
- 52 Gizmodo. The Emerald Ace-Japan's Prius of the sea. Verkkosivut. <<http://gizmodo.com/5921423/the-emerald-ace++japans-prius-of-the-sea>> Luettu 5.3.2013.
- 53 Gizmag. Nissan unveils energy-efficient Nichio Maru car carrier. Verkkosivut. <<http://www.gizmag.com/nissan-nichio-maru-eco-car-carrier/21273/>> Luettu 5.3.2013.
- 54 Yellow & Finch publishers. Hybrid Power System Update For Auriga Leader. Verkkosivut. <<http://www.ynfpublishers.com/2011/06/hybrid-power-system-update-for-auriga-leader/>> Luettu 5.3.2013.
- 55 Autoblog green. Toyota's Auriga Leader transport ship gets hybridized. Verkkosivut. <<http://green.autoblog.com/2011/06/26/toyotas-auriga-leader-transport-ship-gets-hybridized-w-video/>> Luettu 5.3.2013.
- 56 NYK Line. Verkkosivut. <<http://www.nykeurope.com/corporate/image-gallery/view-photo/6/37.html>> Luettu 5.3.2013.